www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 32, 1971, no. 3

Magnetische afbuiging in televisieweergeefbuizen

R. Vonk

Om compactere televisietoestellen te kunnen maken, moeten kortere beeldbuizen worden ontworpen. Dit houdt in dat bij een zelfde grootte van het beeldscherm de elektronen over grotere hoeken moeten worden afgebogen. Juist als in de geometrische optica zijn ook in de elektronenoptica de fouten in een systeem des te groter naarmate de stralen een grotere hoek met de as maken. Bij de bestudering van een elektronenoptisch systeem is het van belang dat de grootheden die de afbeeldingsfouten van het systeem karakteriseren, met voldoende nauwkeurigheid gemeten kunnen worden. Hier is uiteengezet hoe dit is te bereiken door het weloverwogen meten van de magnetische veldsterkte en door vergaande automatisering bij het verwerken van de meetresultaten.

Inleiding

Wanneer we bedenken dat in een televisiebeeld ongeveer 400 000 beeldelementen gescheiden kunnen worden weergegeven, dan zal het duidelijk zijn dat alle hiervoor nodige informatie moeilijk gelijktijdig kan worden overgebracht. Dank zij de traagheid van het menselijk oog is het echter mogelijk de informatie element voor element over te brengen en weer te geven, mits dit in een voldoende snel tempo gebeurt.

Hiertoe wordt bij de momenteel gebruikelijke systemen het beeld volgens een lijnenraster afgetast. Bij het weergeven schrijft een elektronenbundel een zelfde raster op het scherm van een katodestraalbuis, waarbij dan de intensiteit van de bundel op elk moment evenredig is met de helderheid van het weer te geven beeldelement. De bundel, waarin de elektronen een snelheid hebben die overeenkomt met een energie van enige tientallen keV, is met behulp van elektronenlenzen gefocusseerd tot een kleine stip op het scherm.

Het gewenste lijnenraster wordt geschreven door de bundel af te buigen met twee tijdsafhankelijke transversale magneetvelden. Deze magneetvelden worden opgewekt met behulp van twee paar afbuigspoelen, die tegen de hals van de katodestraalbuis zijn aangebracht (*fig. 1*). Bij een ideale afbuiging blijft de focussering van de bundel op het scherm in iedere afgebogen positie behouden en is de verplaatsing op het scherm steeds recht evenredig met de sterkte van het afbuigende veld.

In de praktijk zal deze ideale situatie slechts bij benadering optreden; een elektronenoptische afbeelding vertoont dezelfde soort fouten als een lichtoptische: vertekening, astigmatisme, beeldveldkromming, coma en sferische aberratie. De samenhang van deze fouten met de ruimtelijke verdeling van de magnetische veldsterkte is te berekenen door het oplossen van de bewegingsvergelijking voor een elektron in het gegeven veld. Hierbij maakt men gebruik van een reeksontwikkeling voor de magnetische veldsterkte; de coëfficiënten in deze reeksontwikkeling worden in een concreet geval gevonden uit nauwkeurige metingen van de veldsterkteverdeling. De bewegingsvergelijking voor het elektron is dan numeriek op te lossen en de gevonden oplossing zal een des te betere benadering van de werkelijkheid leveren naarmate er meer termen van de reeks voor de veldsterkteverdeling in aanmerking genomen zijn.

Bij het ontwerpen van afbuigspoelen stellen de resultaten van dergelijke berekeningen ons in staat om voor een bepaalde toepassing een optimaal compromis te vinden tussen de gewenste afbuigingseigenschappen van de spoel en de optredende afbeeldingsfouten.

De gang van zaken bij het ontwerpen van afbuigspoelen is over het algemeen dat aan de hand van ervaring en theoretische kennis een eerste stel spoelen

Ir. R. Vonk, medewerker van Philips' Natuurkundig Laboratorium Eindhoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 1. Eén paar afbuigspoelen tegen de hals van een schaduwmaskerbuis. Om de spoelen zo duidelijk mogelijk te kunnen tonen is een helft van de ferrietkern verwijderd. Normaal zijn twee spoelenparen en de ferrietkern ten opzichte van elkaar gefixeerd in een vatting van kunststof.

wordt gebouwd. Meting van de veldsterkteverdeling van deze spoelen geeft een inzicht in de afbuigingseigenschappen en op grond daarvan kan dan worden aangegeven in welke richting het ontwerp gewijzigd dient te worden. Na een aantal malen meten en corrigeren komt men zo tot het uiteindelijke resultaat. Pas in het laatste stadium van het ontwerp is het nodig om naast het meten van de veldsterkteverdeling, ook het gedrag van de elektronenbundel in dit veld in detail te berekenen.

Het zijn vooral de steeds verder verfijnde methodes voor de meting van de magnetische veldsterkte en de ontwikkeling van computerprogramma's voor het verwerken van de meetresultaten die het ontwerpen van de huidige televisiebeeldbuizen en de bijbehorende afbuigspoelen mogelijk hebben gemaakt. Zij stellen ons in staat om een optimaal gebruik te maken van de reeds lang bestaande theoretische inzichten in de magnetische afbuiging van een elektronenbundel en de daarbij optredende fouten.

Na eerst de wiskundige beschrijving en de meting van het magnetische veld te hebben gegeven, zullen we de afbuiging van een elektronenbundel in dit veld en de afbuigingsfouten behandelen. Ten slotte geven we een tweetal voorbeelden van het ontwerpen van spoelen voor een bepaalde toepassing.

Het veld van de afbuigspoelen

Wiskundige beschrijving van het veld

Voor de beschrijving van het veld van één paar afbuigspoelen kiezen we een rechthoekig coördinatensysteem zoals aangegeven in *fig. 2*. De z-as valt samen met de as van de buis en met de richting van de nietafgebogen elektronenbundel; de x-as is horizontaal gekozen, de y-as verticaal. De getekende situatie geldt voor de in het volgende te behandelen verticale afbuigspoelen. Verwisselen van x en y in de eindresultaten levert de betrekkingen die voor de horizontale afbuigspoelen gelden.

Afgezien van de bundelstroom, die we in dit geval mogen verwaarlozen, lopen er in het gebied waar de afbuiging plaatsvindt geen stromen. Dit betekent dat langs elke gesloten kromme in het gebied de kringintegraal van de magnetische veldsterkte $\mathbf{H}$ nul is, ofwel rot $\mathbf{H} = 0$, zodat we $\mathbf{H}$ kunnen schrijven als de gradiënt van een scalaire magnetische potentiaal Φ, dus $\mathbf{H} = \text{grad}\ \Phi$.

De potentiaal Φ is te ontwikkelen in een reeks in de coördinaten x en y, waarbij de coëfficiënten van de termen functies zijn van z. De meest algemene vorm van deze reeks is:

$$\Phi(x,y,z) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 + a_{30}x^3 + \ldots \qquad (1)$$

De afgeleiden naar x, y en z van deze reeks leveren nu reeksen voor de componenten H_x, H_y en H_z van de veldsterkte. De symmetrie van het veld, die een gevolg is van de symmetrie van een spoelenpaar, maakt dat een groot aantal coëfficiënten in deze reeksen nul zijn. Zo wordt de reeks voor Φ gereduceerd tot:

$$\Phi(x,y,z) = a_{10}x + a_{30}x^3 + a_{12}xy^2 + \ldots . \qquad (2)$$

De coëfficiënten zijn weer functies van z.

De invloed die de symmetrie der spoelen heeft op de vorm van de reeks voor Φ, en daarmee dus ook op die voor de componenten van $\mathbf{H}$, verloopt als volgt. Differentiëren van de reeks (1) naar x levert de x-component van de veldsterkte:

$$H_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = a_{10} + 2\,a_{20}x + a_{11}y + 3\,a_{30}x^2 + \ldots .$$

Uit het in *fig. 3* schematisch weergegeven verloop van de veldlijnen blijkt dat H_x overal hetzelfde teken heeft, er moet dus gelden: $H_x(x,y,z) = H_x(-x,y,z) = H_x(x,-y,z)$. Wil de reeks voor H_x hieraan voldoen, dan mogen daarin alleen even machten van x en y voorkomen, zodat a_{20}, a_{11}, a_{21}, enz. alle nul moeten zijn. Het teken van H_y verandert bij het van teken veranderen zowel van x als van y: $H_y(x,y,z) = -H_y(-x,y,z) = -H_y(x,-y,z)$, zodat in de reeks $H_y = a_{01} + a_{11}x + 2\,a_{02}y + a_{21}x^2 + 2\,a_{12}xy + \ldots$ de coëfficiënten a_{01}, a_{11}, a_{02}, a_{21}, a_{03}, ... nul moeten zijn. Wanneer we nu, rekening houdend met de reeds gevonden resultaten, de reeks voor H_z opschrijven dan

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

krijgen we:

$$H_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = a'_{00} + a'_{10}\, x + a'_{30}\, x^3 + a'_{12}\, xy^2 + \ldots ,$$

waarin de accenten een differentiatie naar z aangeven. In fig. 3 zien we dat moet gelden $H_z(x,y,z) = -H_z(-x,y,z) = H_z(x,-y,z)$, zodat a'_{00} nul zal moeten zijn. De coëfficiënt a_{00} is dus een constante. Zonder verlies van algemeenheid kan deze constante nul gesteld worden.

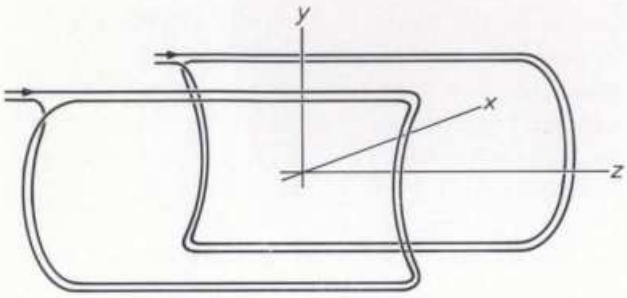


Fig. 2. Coördinatensysteem voor de wiskundige beschrijving van het magneetveld van de afbuigspoelen. De niet-afgebogen elektronenbundel loopt in de richtingen van de positieve z-as. De schematisch weergegeven spoelen zijn die voor afbuiging van de bundel in verticale richting (y-richting).

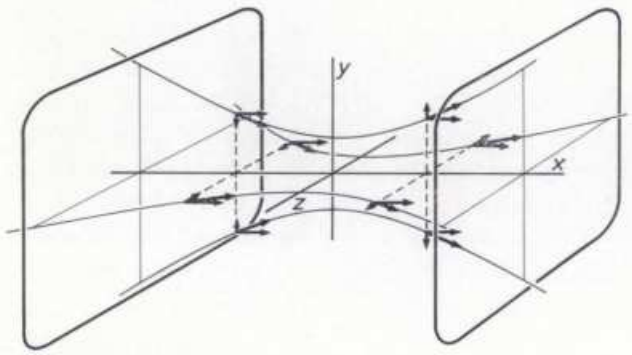


Fig. 3. Schets van het veldlijnenpatroon van de beeldspoel. De veldsterktevectoren zijn in componenten ontbonden om de symmetrie-eigenschappen van het veld te laten zien.

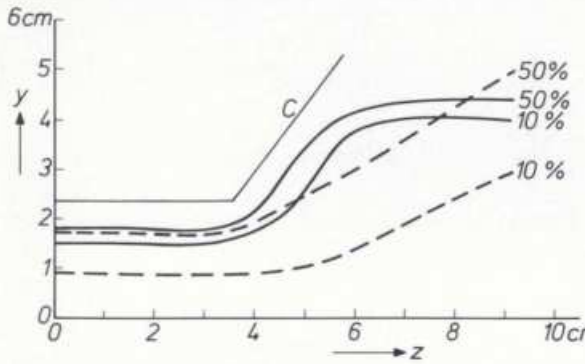


Fig. 4. Contouren van de gebieden in het y-z-vlak waarbinnen de werkelijke en de benaderende waarde van H_x, de x-component van de veldsterkte, niet meer van elkaar afwijken dan de vermelde percentages. De streeplijnen gelden voor de benadering $H_x = H_0 + H_2 y^2$, de getrokken lijnen voor de benadering $H_x = H_0 + H_2 y^2 + H_4 y^4$. De lijn C geeft de doorsnede van de spoel.

Aangezien geïsoleerde magneetpolen niet voorkomen, zijn alle veldlijnen gesloten krommen of wel div $\mathbf{H} = 0$. Dit betekent dat de potentiaal Φ moet voldoen aan de differentiaalvergelijking van Laplace, immers:

$$\text{div}\,\mathbf{H} = \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0.$$

Invullen van de reeks (2) voor Φ levert:

$$\text{div}\,\mathbf{H} = (6\,a_{30} + 2\,a_{12} + a''_{10})x + (20\,a_{50} + 2\,a_{32} + a''_{30})x^3 + \\ + (6\,a_{32} + 12\,a_{14} + a''_{12})xy^2 + \ldots = 0,$$

waarin de accenten differentiaties naar z aangeven. Deze betrekking moet voor iedere waarde van x en y gelden, zodat dus de coëfficiënt van iedere term nul moet zijn. Dit levert vergelijkingen voor de coëfficiënten a van de reeks (2) voor Φ. De eerste drie vergelijkingen luiden:

$$6\,a_{30} + 2\,a_{12} + a''_{10} = 0 \qquad (3a)$$

$$20\,a_{50} + 2\,a_{32} + a''_{30} = 0 \qquad (3b)$$

$$6\,a_{32} + 12\,a_{14} + a''_{12} = 0 \qquad (3c)$$

Voegen we hieraan nog toe de vergelijking die we verkrijgen door (3a) tweemaal naar z te differentiëren:

$$6\,a''_{30} + 2\,a''_{12} + a''''_{10} = 0,$$

dan kunnen we a_{30}, a_{50}, a_{32} en a''_{30} uitdrukken in a_{10}, a_{12}, a_{14} en hun afgeleiden. Met de notatie $a_{10} = H_0$, $a_{12} = H_2$ en $a_{14} = H_4$ levert dit ten slotte de volgende uitdrukkingen voor de componenten van $\mathbf{H}$:

$$\left.\begin{aligned} H_x(x,y,z) &= H_0 - (H_2 + \tfrac{1}{2}H''_0)x^2 + H_2 y^2 + \\ &\quad + (H_4 + \tfrac{1}{8}H''_2 + \tfrac{1}{24}H''''_0)x^4 - \\ &\quad - (6\,H_4 + \tfrac{1}{2}H''_2)\,x^2y^2 + H_4 y^4 + \ldots \\ H_y(x,y,z) &= 2\,H_2 xy - (4\,H_4 + \tfrac{1}{3}H''_2)x^3 y + \\ &\quad + 4\,H_4 xy^3 + \ldots \\ H_z(x,y,z) &= H'_0 x - (\tfrac{1}{3}H'_2 + \tfrac{1}{6}H'''_0)x^3 + \\ &\quad + H'_2 xy^2 + \ldots \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Kennen we nu de numerieke waarden van H_0, H_2, H_4 en de nodige afgeleiden, dan blijkt daarmee, voor niet te grote waarden van x en y, het veld met goede nauwkeurigheid vastgelegd te zijn door de in (4) gegeven begintermen van de reeksontwikkeling (zie *fig. 4*). Naarmate de afbuighoeken waarvoor we het gedrag van de bundel willen beschrijven groter zijn, moeten we meer termen van de reeksontwikkeling kennen: de bundel bevindt zich dan immers in verder van de as gelegen delen van het veld. Voor kleine afbuighoeken daarentegen, is zelfs de waarde van H_2 en van H_4 al niet meer van belang.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Voor een spoel van niet te gecompliceerde vorm en met een beperkt aantal windingen zijn de coëfficiënten H_0, H_2 en H_4 met behulp van de wet van Biot en Savart uit te drukken in de parameters die de geometrie van de spoel karakteriseren [1]. Er mogen zich in dit geval geen ferromagnetische onderdelen, zoals een spoelkern of magnetische afschermingen, in de buurt bevinden. Meestal zijn deze echter wel aanwezig en is ook de geometrie van de windingen zo gecompliceerd dat berekenen van de coëfficiënten niet mogelijk is, zodat zij door meting van de veldsterkteverdeling moeten worden bepaald.

Principe van de meting der coëfficiënten H_0, H_2 en H_4

De reeksen (4) voor de componenten van **H** gaan voor $x = 0$ over in:

$$\left.\begin{aligned} H_x(0,y,z) &= H_0 + H_2y^2 + H_4y^4 + \dots \\ H_y(0,y,z) &= 0 \\ H_z(0,y,z) &= 0 \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Dit betekent dat het om H_0, H_2 en H_4 te kunnen berekenen, voldoende is alleen H_x te meten, en wel uitsluitend in punten in het y-z-vlak. In principe zou voor elke waarde van z kunnen worden volstaan met metingen voor slechts drie verschillende waarden van y. Een meting voor $y = 0$ levert H_0, waarna twee metingen, met bij voorbeeld $y = 5$ mm en $y = 10$ mm, voldoende zouden zijn om H_2 en H_4 te bepalen.

De nauwkeurigheid die bij deze metingen geëist wordt is echter tamelijk hoog. We willen nl., behalve de coëfficiënten H_0, H_2 en H_4, uit de metingen ook nog een aantal afgeleiden van deze coëfficiënten naar z kunnen berekenen en wel die van H_0 tot en met de vierde orde en die van H_2 tot en met de tweede orde. Bovendien blijkt in de omgeving van de as de bijdrage van de termen met H_2 en H_4 zeer gering te zijn. In het beschouwde gebied geldt in een bepaald geval: $H_2y^2/H_0 \leqq 0{,}025$ en $H_4y^4/H_0 \leqq 0{,}006$ als $y = 5$ mm. Het is niet mogelijk deze verhoudingen gunstiger te maken door de metingen uit te voeren voor aanzienlijk grotere waarden van y, omdat dan de benadering $H_x = H_0 + H_2y^2 + H_4y^4$, waarvan we bij het verwerken van de metingen gebruik maken, niet voldoende nauwkeurig meer is (zie fig. 4). Ook laat de geometrie van de spoelen doorgaans niet toe dat we metingen doen waarbij y groter zou zijn dan 5 à 10 mm. Om nu de vereiste nauwkeurigheid te kunnen bereiken wordt H_x bij elke z-waarde gemeten voor minstens vijf verschillende waarden van y. Hieruit zijn dan niet alleen H_0, H_2 en H_4 en hun afgeleiden te berekenen, maar ook eventuele asymmetrieën in de spoelen. Het meer dan strikt nodige aantal metingen levert bovendien de mogelijkheid een aantal systematische meetfouten te constateren. Zo nodig kunnen de meetresultaten eerst voor deze fouten worden gecorrigeerd voordat zij verder worden verwerkt. Op deze correcties komen we nog terug na het bespreken van de eigenlijke metingen.

Uitvoering van de metingen

Bij de veldsterktemeting wordt de spoel bekrachtigd door een wisselstroom met een sterkte van 1 A en een frequentie van 4 kHz. De in een in het veld geplaatst meetspoeltje opgewekte inductiespanning is nu een maat voor de veldsterktecomponent evenwijdig aan de as van dit spoeltje. Door geschikte keuze van de vorm van het meetspoeltje is te bereiken dat de veldsterkte in een punt in het centrum van het spoeltje wordt gemeten, en niet een gemiddelde waarde over het gehele volume ervan [2], iets wat bij het gebruik van andere meetsonden, zoals bij voorbeeld Hall-plaatjes, het geval zou zijn.

Voor een deel van onze metingen gebruiken we twee identieke spoeltjes. Hiervan kunnen we er één op de z-as in het te meten veld plaatsen en het andere evenwijdig daarmee, op een afstand van 5 mm in de y-richting. Deze twee spoeltjes leveren dan tegen elkaar in geschakeld, een signaal dat een maat is voor het verschil in veldsterkte tussen deze beide punten. Dit verschil is volgens (5) gelijk aan $H_2y^2 + H_4y^4$ en kan dus direct gebruikt worden voor het berekenen van H_2 en H_4. Een voordeel is dat we zo bij alle metingen nauwkeurig een zelfde verschil in positie tussen beide spoeltjes hebben.

Het schema van de voor deze metingen gebruikte apparatuur is gegeven in *fig. 5*. De meetspoeltjes worden langs een rechte lijn evenwijdig met de z-as door het te meten veld bewogen met behulp van een wormas, aangedreven door een stappenmotor. De motor moet voor één omwenteling van de as een groot aantal stappen maken, zodat de afstand tussen twee opeenvolgende meetpunten met de nodige nauwkeurigheid kan wor-

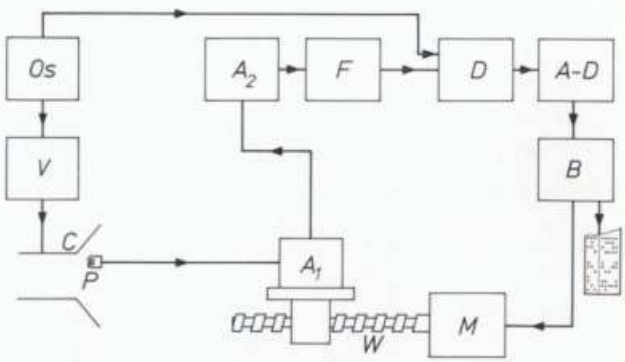


Fig. 5. Blokschema van de meetapparatuur. *Os* oscillator (4 kHz). *V* vermogensversterker die de te meten spoel *C* voedt. *P* proefspoeltje dat met behulp van de wormas *W* en de stappenmotor *M* door het veld wordt bewogen. *F* 4-kHz-filter. *D* synchrone detector. *A-D* analoog-digitaal-omzetter. *B* bandponser en digitale besturing. A_1 en A_2 versterkers.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

den afgepast. Nadat voor één y-waarde het hele veld in de z-richting is doorlopen, worden de afbuigspoelen en de meetspoeltjes in de y-richting ten opzichte van elkaar verplaatst over een nauwkeurig bekende afstand en wordt een nieuwe serie metingen gedaan. *Fig. 6* toont een complete afbuigeenheid op de meetopstelling.

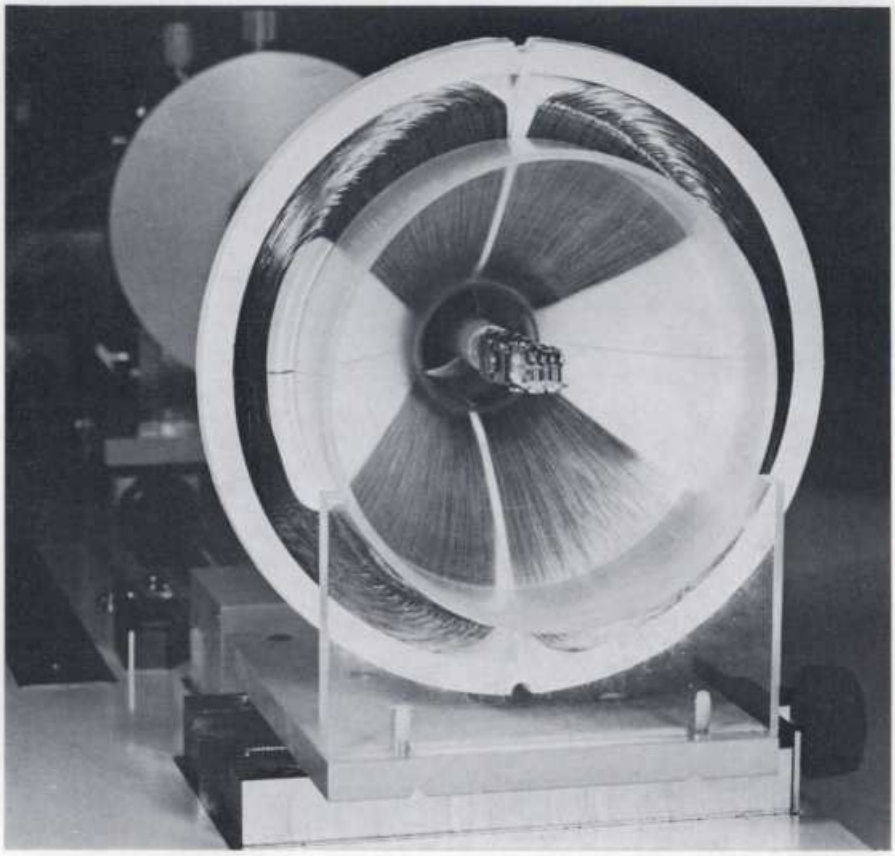


Fig. 6. De afbuigeenheid op de opstelling voor het meten van de veldverdeling in de omgeving van de as. Uit deze veldverdeling worden de coëfficiënten H_0, H_2 en H_4 met hun afgeleiden berekend. Van de beide spoelenparen is er slechts een zichtbaar. Door de halsopening van de afbuigeenheid steken de beide meetspoeltjes. In de afgebeelde positie meten de spoeltjes het veld van het niet zichtbare spoelenpaar. De afbuigeenheid staat op een slede waarmee zij kan worden verplaatst ten opzichte van de lijn waarlangs de spoeltjes tijdens de meting bewogen worden.

Het meetsignaal van een spoeltje, of het verschilsignaal van beide spoeltjes, wordt versterkt, passeert een 4-kHz-filter en wordt dan met behulp van een synchrone detector gemeten. Het referentiesignaal voor deze detector wordt geleverd door dezelfde 4-kHz-oscillator die ook, via een vermogensversterker, de voeding van de te meten afbuigspoelen verzorgt. De meetresultaten worden na analoog-digitaalomzetting op ponsband afgeleverd, zodat ze direct voor computerverwerking geschikt zijn.

Voordat de uiteindelijke verwerking van de meetgegevens plaatsvindt, worden ze eerst gecorrigeerd voor eventuele ongelijkheid van de beide meetspoeltjes. Deze ongelijkheid is te voren door een afzonderlijke meting bepaald. Na deze correctie worden H_0, H_2 en H_4 berekend uit de metingen die voor één waarde van z zijn gedaan. Ook is het mogelijk om uit de metingen vast te stellen of de lijn waarlangs de meetspoeltjes zijn bewogen op de juiste afstand evenwijdig met de z-as heeft gelopen. Zo niet, dan worden de meetgegevens gecorrigeerd, zowel voor de afwijkende afstand als voor afwijkingen in de evenwijdigheid, waarna de uiteindelijke waarden van H_0, H_2 en H_4 als functie van z worden berekend en ten slotte ook nog de nodige afgeleiden van deze coëfficiënten naar z.

In *fig. 7* zijn voor een spoel met een eenvoudige geometrie zowel de gemeten als de met behulp van de wet van Biot en Savart berekende waarden van H_0, H_2 en H_4 uitgezet als functie van z. Het feit dat het verschil tussen gemeten en berekende waarden volledig te verklaren is door één klein verschil tussen de werkelijke en de bij de berekeningen aangenomen geometrie van de spoel te veronderstellen, demonstreert de betrouwbaarheid van onze metingen.

[1] J. Kaashoek, dissertatie, Eindhoven 1968 (ook uitgegeven als Philips Res. Repts. Suppl. 1968, no. 11), blz. 44-48.
[2] R. F. K. Herzog en O. Tischler, Rev. sci. Instr. **24**, 1000, 1953.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

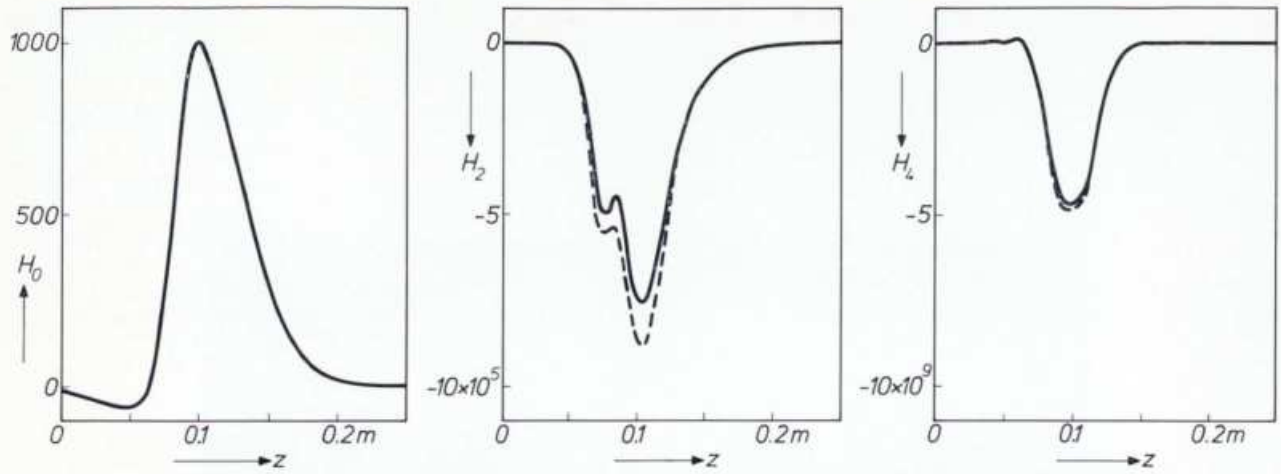


Fig. 7. Gemeten waarden (getrokken lijn) en berekende waarden (streeplijn) van de coëfficiënten H_0, H_2 en H_4 voor een spoel met eenvoudige geometrie. Het geringe verschil tussen de gemeten en de berekende krommen voor H_2 en H_4 kan volledig verklaard worden door één klein verschil in geometrie aan te nemen tussen de werkelijke spoel en de voor de berekeningen gebruikte configuratie.

De beweging van een elektron in een magnetisch veld

De bewegingsvergelijking

Er bestaat een verregaande analogie tussen de geometrische optica en de elektronenoptica. Voor het afleiden van de vergelijking voor de baan van een elektron in een gegeven elektrisch of magnetisch veld kunnen we dan ook uitgaan van het beginsel van Fermat, dat in de geometrische optica wordt gebruikt voor de berekening van de gang van lichtstralen. Het beginsel van Fermat zegt dat de lichtweg, gemeten in golflengten van het licht, niet langer is dan mogelijke naburige wegen. Of, anders gezegd: de variatie der optische weglengte moet nul zijn; dit wordt uitgedrukt door de vergelijking:

$$\delta \int_P^Q \frac{\mathrm{d}l}{\lambda_0/n} = 0.$$

Hierin is δ het teken voor variatie, $\mathrm{d}l$ een elementje van de lichtweg tussen P en Q, n de brekingsindex ter plaatse van $\mathrm{d}l$ en λ_0 de golflengte van het licht in vacuüm. Aangezien λ_0 een constante is, is bovenstaande vergelijking gelijkwaardig met:

$$\delta \int_P^Q n \, \mathrm{d}l = 0. \qquad (6)$$

Deze vergelijking is ook te gebruiken voor het berekenen van elektronenbanen in elektrische en magnetische velden; we moeten daartoe voor de brekingsindex van dit veld schrijven:

$$n = \sqrt{U} - \sqrt{e/(2\,m)}\ \mathbf{A}\cdot\mathbf{s}. \qquad (7)$$

In deze uitdrukking is U de elektrostatische potentiaal ten opzichte van de katode waar de elektronen zijn geëmitteerd, e en m zijn lading en massa van het elektron, $\mathbf{A}$ is de magnetische vectorpotentiaal en $\mathbf{s}$ de eenheidsvector in de richting van de elektronenbaan. (De vectorpotentiaal $\mathbf{A}$ wordt verkregen door een integratie van de tot het veld bijdragende elektrische stromen, op dezelfde wijze als de elektrostatische potentiaal wordt verkregen door een integratie van een ladingsverdeling; de vectorpotentiaal $\mathbf{A}$ en de magnetische inductie $\mathbf{B}$ hangen samen volgens $\mathbf{B} = \mathrm{rot}\ \mathbf{A}$.) Door het scalaire produkt van $\mathbf{A}$ en $\mathbf{s}$ in de uitdrukking (7) voor de brekingsindex, is deze brekingsindex richtingsafhankelijk: de elektronen bewegen zich in een anisotroop medium.

Voor de berekening van de elektronenbanen in een beeldbuis kiezen we hetzelfde rechthoekige assenstelsel als we voor de beschrijving van het magneetveld hebben gebruikt. Nemen we ook hier weer z als onafhankelijke variabele, dan levert invullen van (7) in (6):

$$\delta \int \left\{ \sqrt{U(1 + x'^2 + y'^2)} - \right.$$
$$\left. - \sqrt{\frac{e}{2\,m}} \left(A_x x' + A_y y' + A_z\right) \right\} \mathrm{d}z = 0. \qquad (8)$$

Wil een functie F voldoen aan $\delta \int F \, \mathrm{d}z = 0$, dan zal zij tevens moeten voldoen aan de differentiaalvergelijkingen van Euler en Lagrange [3]:

$$\frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\frac{\partial F}{\partial x'} = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\frac{\partial F}{\partial y'} = 0.$$

Vullen we voor de functie F de uitdrukking in die in de betrekking (8) tussen accolades staat, dan levert dit

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

na enige herleidingen en met gebruikmaking van $\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H} = \text{rot}\,\mathbf{A}$, de volgende differentiaalvergelijkingen voor de baan van een elektron [4]:

$$\left.\begin{aligned} x''(z) &= -\mu_0 \sqrt{\frac{e}{2mU}}\,\sqrt{1+x'^2+y'^2}\,\times \\ &\quad \times\{x'y'H_x-(1+x'^2)H_y+y'H_z\} \\ y''(z) &= \mu_0 \sqrt{\frac{e}{2mU}}\,\sqrt{1+x'^2+y'^2}\,\times \\ &\quad \times\{x'y'H_y-(1+y'^2)H_x+x'H_z\} \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

Wanneer we nu de eerder gevonden reeksen (4) voor de componenten van $\mathbf{H}$ invullen en bovendien ook de wortelvorm $\sqrt{1+x'^2+y'^2}$ in een reeks ontwikkelen, dan vinden we voor x'' en y'' reeksen in x, y, x' en y'. Door deze reeksen na een bepaald aantal termen af te breken en de resulterende differentiaalvergelijkingen op te lossen, verkrijgen we benaderende uitdrukkingen voor de elektronenbanen. Randvoorwaarden bij het oplossen van de differentiaalvergelijkingen zijn de plaats waar een elektron het veld binnenkomt en de helling van de baan daar ter plaatse. Aangezien de bekende reeks van McLaurin voor bovenstaande wortelvorm alleen geldig is voor $\sqrt{x'^2+y'^2} \leqq 1$, zullen ook alle verdere hiermee verkregen resultaten deze zelfde beperking hebben. Dit betekent dus dat zij principiëel niet meer gelden voor afbuighoeken groter dan 45°. Dat de benaderende uitdrukkingen, verkregen door het afbreken van de reeksen (4), ons al eerder in de steek laten is begrijpelijk; hoever de verschillende benaderingen nog wel gelden was te zien in fig. 4. Voor afbuighoeken groter dan 40° moeten we gebruik maken van de nog te bespreken metingen van het gehele veld en kunnen we niet meer volstaan met metingen alleen in de omgeving van de z-as.

Eerste-ordebenadering

De eerste-ordebenadering van de elektronenbanen krijgen we door in de reeksontwikkeling voor de vergelijkingen (9) alle termen van de eerste graad en hoger in x, y, x' en y' te verwaarlozen. We vinden dan:

$$\left.\begin{aligned} x'' &= 0, \\ y'' &= -\mu_0\sqrt{e/2mU}\;H_0 = -k\,H_0. \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Komt het elektron het magnetische veld binnen in het punt (x_0,y_0,z_0) onder een hoek gegeven door x_0' en y_0' en veronderstellen we U, en daarmee dus ook k, constant, dan levert tweemaal integreren van (10) de eerste-ordebenadering van de vergelijkingen voor de elektronenbanen:

$$x(z) = x_0 + x_0'(z-z_0),$$

$$y(z) = y_0 + y_0'(z-z_0) - k\int_{z_0}^{z}\int_{z_0}^{\zeta} H_0(\xi)\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\zeta.$$

Hierin zijn ξ en ζ integratievariabelen. Deze vergelijkingen worden ook wel baanvergelijkingen van Gauss of paraxiale baanvergelijkingen genoemd. Dit laatste omdat de vergelijkingen alleen die banen goed beschrijven die in de onmiddellijke omgeving van de z-as verlopen en slechts kleine hoeken met die as maken.

Omdat x_0, y_0, x_0' en y_0' doorgaans moeilijk te bepalen zijn, maken we liever gebruik van de waarden van deze parameters omgerekend op de positie z_s van het fluorescentiescherm. Substitutie van:

$$x_s' = x_0', \quad x_s = x_0 + x_0'(z_s-z_0),$$
$$y_s' = y_0', \quad y_s = y_0 + y_0'(z_s-z_0),$$

levert ons dan de paraxiale baanvergelijkingen in de vorm:

$$x(z) = x_s + x_s'(z-z_s),$$

$$y(z) = y_s + y_s'(z-z_s) - k\int_{z_0}^{z}\int_{z_0}^{\zeta} H_0(\xi)\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\zeta = y_s + y_s'(z-z_s) + Y.$$

De bundelparameters x_s, y_s, x_s' en y_s' geven positie en helling van de niet-afgebogen bundel ter plaatse van het scherm en Y geeft de verplaatsing van de bundel ten gevolge van het magneetveld. Deze verplaatsing is recht evenredig met de sterkte van het veld en onafhankelijk van de bundelparameters, dus voor iedere positie van de niet afgebogen bundel dezelfde. De afbuiging is dus ideaal en van enigerlei afbeeldingsfout is bij deze eerste-ordebenadering geen sprake.

In de reeksontwikkeling voor de vergelijkingen (9) komen geen termen voor die lineair zijn in x, y, x' of y'; een tweede-ordebenadering levert dus niets nieuws.

Derde-ordebenadering

Breken we de reeksontwikkelingen voor de vergelijkingen (9) af na de termen van de tweede graad in x, y, x' en y', dan levert ons dit de differentiaalvergelijkingen:

$$x''(z) = -k\,(x'y'H_0 + xy'H_0' - 2\,xyH_2),$$

$$y''(z) = -k\,\{H_0 + \tfrac{1}{2}(x'^2+y'^2)H_0 - x'xH_0' - x^2(H_2+\tfrac{1}{2}H_0'') + y^2H_2 + y'^2H_0\}.$$

[3] Zie b.v. M. Born en E. Wolf, Principles of optics, 3e druk, Pergamon Press, Londen 1965, appendix I, of H. Margenau en G. M. Murphy, The mathematics of physics and chemistry, 2e druk, Van Nostrand, Princeton, N.J., 1956, hfdst. 6, of J. Mathews en R. L. Walker, Mathematical methods of physics, 2e druk, Benjamin, New York 1965, hfdst. 12.

[4] Voor de afleiding zie blz. 79 van de in [1] aangehaalde dissertatie van J. Kaashoek.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Behalve de coëfficiënt H_0, die ook al in de eerste-ordebenadering optrad, blijken we nu ook nog H_2, H_0' en H_0'' te moeten kennen om numerieke berekeningen te kunnen uitvoeren.

De oplossing van beide bovenstaande simultane differentiaalvergelijkingen kunnen we benaderen door voor x, y, x' en y' de oplossingen van de eerste-ordevergelijkingen in te vullen en de zo verkregen uitdrukkingen voor x'' en y'' tweemaal te integreren. Deze berekeningen resulteren in de volgende uitdrukkingen voor het landingspunt van een baan op het scherm:

$$x(z_s) = x_s + (B_5 x_s' + B_{10} x_s) Y_s^2 + \\ + (2B_8 x_s' y_s' + B_{15} x_s y_s + B_{17} x_s' y_s + B_{18} x_s y_s') Y_s$$

$$y(z_s) = y_s + Y_s + B_1 Y_s^3 + (B_4 y_s' + B_9 y_s) Y_s^2 + \\ + (B_7 y_s'^2 + B_8 x_s'^2 + B_{13} y_s^2 + B_{14} x_s^2 + \\ + B_{16} y_s y_s' + B_{18} x_s x_s') Y_s \qquad (11)$$

Hierin is $Y_s = -k \int_{z_0}^{z_s} \int_{z_0}^{\zeta} H_0(\xi)\, d\xi d\zeta$, de coëfficiënten B zijn integralen van dezelfde vorm die de veldcoëfficiënten H_0, H_2, H_0' en H_0'' bevatten.

Deze uitdrukkingen voor de afbuiging zijn geldig tot op grotere afstanden van de z-as dan de resultaten van de eerste-ordebenadering. We zien nu echter dat er afbeeldingsfouten optreden, die groter zijn naarmate de onafgebogen bundel verder van de z-as ligt of een grotere hoek daarmee maakt. Dat de uitdrukking voor $x(z_s)$ termen bevat die afhankelijk zijn van Y_s, wil zeggen dat in het algemeen bij afbuiging in de y-richting tevens een uitwijking van de bundel in de x-richting optreedt in die gevallen waarin niet alle bundelparameters nul zijn.

De fout die onafhankelijk is van de bundelparameters x_s, y_s, x_s' en y_s', en die evenredig blijkt te zijn met Y_s^3, heet vertekening. De termen in (11) die recht evenredig zijn met de bundelparameters en met het kwadraat van Y_s, beschrijven de beeldveldkromming en het astigmatisme. Ten slotte is er een fout die afhangt van het kwadraat van de bundelparameters en die recht evenredig is met Y_s, dit is de zg. coma.

Voor een parallelle bundel die langs de z-as het magneetveld binnenkomt ($x_s = y_s = x_s' = y_s' = 0$), worden de uitdrukkingen (11) zeer veel eenvoudiger:

$$x(z_s) = 0 \ ,$$

$$y(z_s) = Y_s + B_1 Y_s^3 \ .$$

Hierin karakteriseert de coëfficiënt B_1 een vertekening, de niet-lineariteit in de verplaatsing (*fig. 8a*). Deze fout wordt in de praktijk gecorrigeerd door de afbuigstroom zodanig met de tijd te laten toenemen (fig. 8*b*) dat de lichtstip op het scherm van de beeldbuis zich lineair met de tijd verplaatst (de zg. S-correctie).

Een bundel met een eindige doorsnede, die in niet-afgebogen toestand in het midden van het scherm ($x_s = y_s = 0$) gefocusseerd is, blijkt bij afbuiging aanleiding te geven tot een ellipsvormig vlekje. Een nadere bestudering van de bundel leert (*fig. 9*) dat er twee plaatsen zijn, A en B, waar de bundel tot een lijntje is gefocusseerd (het uit de optica bekende astigmatisme). In een punt C, dat ergens tussen A en B ligt, zal de

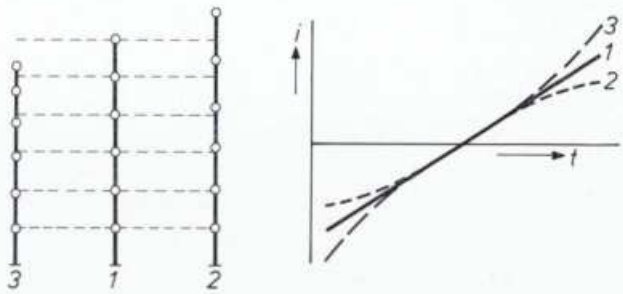


Fig. 8. *a*) Afbuiging in verticale richting van een elektronenbundel die langs de z-as het magneetveld binnenkomt. *1* de ideale afbuiging, recht evenredig met de sterkte van het magneetveld (de coëfficiënt B_1 in $y(z_s) = Y_s + B_1 Y_s^3$ is nul). *2* de vertekening voor het geval dat $B_1 < 0$ is. *3* idem voor het geval dat $B_1 > 0$ is. *b*) De afbuigstroom i als functie van de tijd t. *1* lineair met de tijd variërende stroom (voor ideale afbuiging). *2*, *3* gecorrigeerde stromen voor resp. $B_1 < 0$ en $B_1 > 0$ (zg. S-correctie).

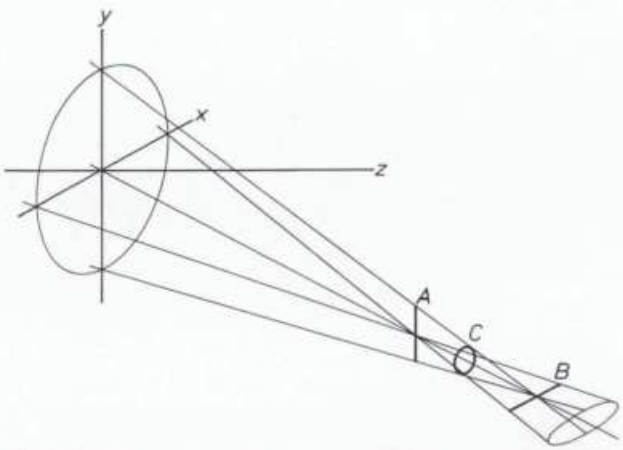


Fig. 9. Astigmatische bundel. De bundel is niet gefocusseerd in één punt, maar vertoont twee brandlijntjes bij A en B. Bij C heeft de bundel een cirkelvormige doorsnede.

bundel een cirkelvormige doorsnede hebben. Als de punten A en B samenvallen met C, is er geen astigmatisme, de afbuigspoelen heten dan anastigmatisch. Het vlak door alle punten A die bij afbuiging over verschillende hoeken optreden, is het zg. sagittale beeldvlak, de punten B leveren het zg. meridionale beeldvlak, tussen deze beide vlakken in leveren de punten C het gemiddelde beeldvlak. De beeldvlakken zullen in het algemeen, ook wanneer ze samenvallen, geen platte

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

doch gekromde vlakken zijn. De coëfficiënten B_4 en B_5 in de vergelijkingen (11) geven de kromming van respectievelijk het meridionale en het sagittale beeldvlak.

Het verband tussen B_4 en de kromming van het meridionale beeldvlak vinden we door twee deelbundeltjes (*1* en *2* in *fig. 10*) te beschouwen van een elektronenbundel die in niet-afgebogen toestand op het midden van het scherm is gefocusseerd. Voor het bundeltje *1* geldt: $x_s = y_s = x_s' = y_s' = 0$; voor *2* geldt: $x_s = y_s = x_s' = 0$, terwijl hier y_s' van nul verschilt, doch zo klein is dat $y_s'^2 \approx 0$. Voor het beschrijven van het gedrag van deze bundeltjes kunnen we dus de vergelijkingen (11) vereenvoudigen tot:

$$x(z_s) = 0 \ ,$$

$$y(z_s) = Y_s + B_1 Y_s^3 + B_4 y_s' Y_s^2 \ .$$

Als ze worden afgebogen over een afstand Y_s, is het verschil in positie van beide bundeltjes op het scherm: $\Delta y(z_s) = B_4 y_s' Y_s^2$. Er is een punt waar de afgebogen bundeltjes *1'* en *2'* elkaar snijden ($\Delta y(z) = 0$). De meetkundige plaats van deze snijpunten is het meridionale beeldvlak. Dit vlak is bolvormig en heeft een kromtestraal ϱ_m.

Het bundeltje *2* komt het magneetveld binnen op een afstand r van de as, zodat $(y_s')_2 = -r/(z_s - z_0)$. Wanneer we voor de benaming van punten en lijnstukken de aanduidingen in fig. 10 aanhouden, dan verloopt de berekening verder als volgt. In deze figuur zien we dat $\Delta y/r = u/(z_s - z_0 - u)$ is en $\varrho_m^2 = v^2 + (\varrho_m - u)^2$. Dit laatste kunnen we schrijven als $v^2 = 2\varrho_m u - u^2$ waaruit, als u zo klein is dat $u^2 \ll 2\varrho_m u$ en $Y_s \approx v$, volgt dat $u \approx Y_s^2/2\varrho_m$. Als we dit invullen in de betrekking voor $\Delta y/r$ en daarin bovendien $z_s - z_0 - u$ vervangen door $z_s - z_0$, dan vinden we:

$$\Delta y \approx \frac{Y_s^2 r}{2\varrho_m (z_s - z_0)} \ ,$$

of, aangezien $y_s' = -r/(z_s - z_0)$ is:

$$|\Delta y| \approx \frac{y_s' Y_s^2}{2\varrho_m} \ .$$

Deze uitdrukking moet gelijk zijn aan $B_4 y_s' Y_s$, zodat dus $B_4 = 1/(2\varrho_m)$. Op soortgelijke wijze vinden we dat $B_5 = 1/(2\varrho_s)$, waarin ϱ_s de kromtestraal van het sagittale beeldvlak, door uit te gaan van twee bundeltjes die met een gering positieverschil in de x-richting het magneetveld binnenkomen.

Vijfde-ordebenadering

Wanneer we de reeksontwikkeling van de vergelijkingen (9) tot en met de termen van de vierde graad in x, y, x' en y' voortzetten, krijgen we de vijfde-ordebenadering. Een vierde-ordebenadering bestaat niet, daar de reeks geen derdegraadsterm en in deze veranderlijken bevat.

De coëfficiënten van de vijfde-ordevergelijkingen zijn integralen waarin de coëfficiënten H_0, H_2 en H_4 van de reeksontwikkeling voor het magnetische veld voorkomen, alsmede de afgeleiden H_0', H_0'', H_0''', H_0'''', H_2' en H_2''. Al deze grootheden zijn, zoals eerder beschreven, uit de metingen van de magnetische veldsterkte te bepalen.

Omdat de vijfde-ordebenadering aanleiding geeft tot resultaten die weinig overzichtelijk zijn, willen we er hier niet verder op ingaan [5]. We volstaan met een grafiek (*fig. 11*) waarin voor twee bepaalde beeldfouten de gemeten fouten zijn weergegeven, alsmede de krommen die het verloop van deze fout geven, berekend met behulp van de derde- respectievelijk de vijde-ordebenadering. De winst in nauwkeurigheid die in de meer naar de buitenzijde gelegen gedeelten van het beeldscherm wordt verkregen met de vijfde-ordebenadering is duidelijk.

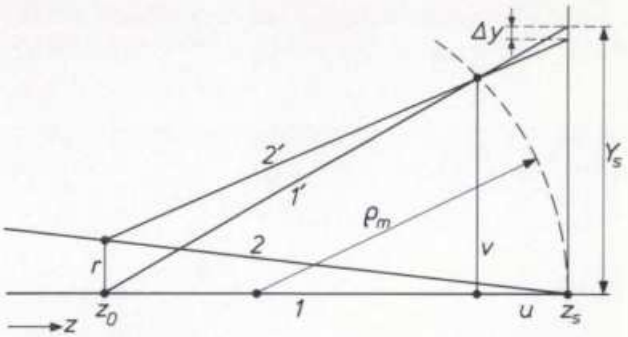


Fig. 10. Bij de berekening van het verband tussen de coëfficiënt B_4 en de kromtestraal ρ_m van het meridionale beeldvlak.

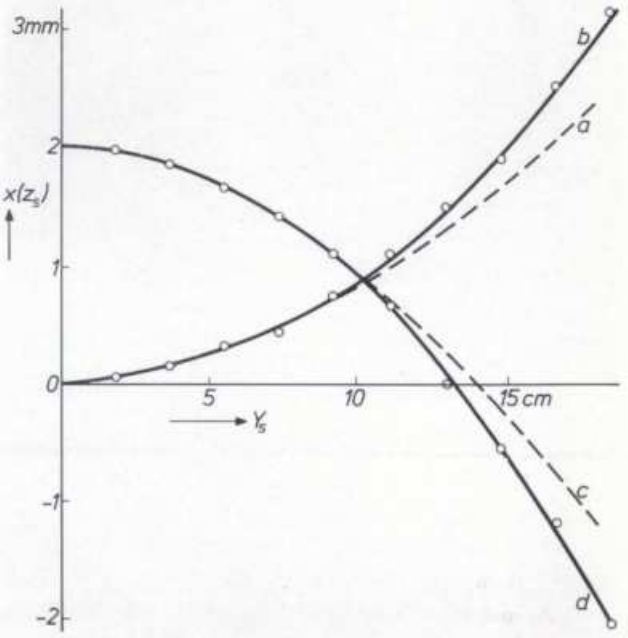


Fig. 11. Bij afbuiging in de y-richting treedt ook een uitwijking van de bundel in de x-richting op. De grafiek geeft gemeten en berekende waarden van afbuigingsfouten $x(z_s)$ bij afbuiging over een afstand Y_s in de y-richting. (Y_s is evenredig met de stroom door de afbuigspoelen.) *a*) Derde-ordebenadering van een bundel waarvoor alléén $x_s' \neq 0$. *b*) Vijfde-ordebenadering voor hetzelfde geval. *c*) Derde-ordebenadering voor een bundel waarvoor alléén $x_s \neq 0$. *d*) Vijfde-ordebenadering voor dit zelfde geval. De cirkeltjes geven de gemeten afbuigingsfouten.

[5] Een volledige behandeling van de vijfde-ordebenadering is te vinden in hfdst. 5 van de in [1] aangehaalde dissertatie van J. Kaashoek.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De hele beschouwing is tot nu toe welbewust beperkt gehouden tot afbuiging in één richting, door het magneetveld van één spoelenpaar. Door de reeksen voor de onderling loodrechte magneetvelden van twee spoelenparen te combineren, zijn reeksontwikkelingen voor de vergelijkingen (9) te geven waardoor de beweging van een elektron in het gezamenlijke veld van de beide spoelenparen beschreven wordt[6]. We zullen deze hier niet behandelen.

Berekening voor grote afbuighoeken

De in het voorgaande gegeven benaderingen gelden, zoals reeds is opgemerkt, essentieel alleen voor afbuighoeken kleiner dan 45°, terwijl in de praktijk de benaderingen slechts tot afbuighoeken van 40° bruikbaar blijken te zijn.

Fig. 12. Opstelling voor het meten van de veldsterkte van een afbuigeenheid in het gehele relevante deel van de ruimte. De boven de afbuigeenheid zichtbare meetsonde heeft een meetspoeltje, hetwelk geplaatst is onder een hoek van 45° met de hier verticaal staande z-as van de afbuigeenheid. In één punt worden vier metingen gedaan, waarbij na iedere meting de sonde over 90° om haar verticale as wordt gedraaid. De sonde kan elk gewenst punt van het veld bereiken, doordat zij in verticale richting verplaatsbaar is en de afbuigeenheid in beide horizontale richtingen kan worden bewogen met een kruisslede. Alle bewegingen geschieden automatisch volgens een tevoren opgesteld programma; de meetresultaten worden op ponsband afgeleverd voor verdere verwerking met behulp van een computer.

Bij het ontwerpen van de moderne zg. 110°-beeldbuizen, waarin de grootste afbuighoek 55° is, waren we dan ook gedwongen om voor de randen van het scherm de elektronenbaanvergelijkingen (9) op te lossen door directe integratie. Daartoe moeten in het hele in aanmerking komende gebied de veldcomponenten H_x, H_y en H_z als functie van x, y en z bekend zijn. We kunnen hiervoor geen gebruik maken van de voor de veldsterkte gegeven reeksontwikkelingen (4). Wanneer we een beperkt aantal termen gebruiken, vertonen deze reeksontwikkelingen voor grote waarden van x en y ontoelaatbare afwijkingen tussen de berekende en de werkelijke veldsterkte. De enige mogelijkheid die ons overblijft, is in dit gebied de componenten van de veldsterkte in een voldoend groot aantal punten te meten. De hiertoe gebouwde meetopstelling is afgebeeld in *fig. 12*. De ervaring, opgedaan met de automatisering van de eerder beschreven metingen, heeft het mogelijk gemaakt dit omvangrijke meetwerk te automatiseren en de resultaten ervan met behulp van een computer te verwerken. Met deze gegevens zijn we nu in staat de prestaties van een gegeven spoel volledig te berekenen.

Twee toepassingen

De schaduwmaskerbuis

De schaduwmaskerbuis is het momenteel algemeen gebruikelijke type kleurenbeeldbuis. De kleuren worden, zoals bekend, verkregen door additieve menging van drie basiskleuren: rood, groen en blauw. De buis bevat hiertoe drie elektronenkanonnen, die meestal in een gelijkzijdige driehoek om de buisas zijn geplaatst, terwijl op het scherm een regelmatig stippenpatroon van rode, groene en blauwe fosforen is aangebracht. Een op korte afstand van het scherm geplaatste geperforeerde plaat, het schaduwmasker, zorgt ervoor dat de elektronenbundel van elk kanon slechts op stippen van één kleur valt. Dit wordt bereikt doordat de bundels, door de plaatsing der kanonnen op enige afstand van de as van de buis, het masker onder verschillende hoeken treffen. Wanneer zij door eenzelfde gat in het masker gaan, vallen zij op drie verschillende stippen (*fig. 13*) en leveren zo drie deelbeelden in de basiskleuren.

Een eis voor goede kleurweergave is dat de drie deelbeelden overal op het scherm nauwkeurig met elkaar tot dekking gebracht zijn. Om dit te bereiken moeten de drie elektronenbundels in iedere afgebogen positie op eenzelfde plaats op het scherm gericht zijn. Hiertoe is een correctie nodig, de zg. convergentie-correctie [7].

Willen we kunnen volstaan met een regelmatig

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

patroon van fosforstippen op het scherm, dan zullen de drie bundels die door éénzelfde gat in het masker vallen, stippen op het scherm moeten projecteren die steeds de hoekpunten van een gelijkzijdige driehoek vormen (*fig. 14*). De drie bundels moeten hiertoe niet alleen in elke afgebogen positie convergeren, maar zij moeten ook steeds dezelfde hoek insluiten wanneer zij op het schaduwmasker vallen. Is het landingspatroon niet overal op het scherm een even grote gelijkzijdige driehoek, dan is dit te corrigeren door de afstand tussen masker en scherm plaatselijk te veranderen.

Astigmatisme van het afbuigsysteem veroorzaakt een niet-gelijkvormige deformatie van het landingspatroon. We moeten dus eisen dat de afbuigspoelen anastigmatisch zijn. Dit houdt in dat de coëfficiënten B_4 en B_5 aan elkaar gelijk moeten zijn. Enig astigmatisme is nog wel toelaatbaar, aangezien de fosforstippen op het scherm een grotere doorsnede hebben dan de door de gaten in het schaduwmasker doorgelaten bundels.

In de praktijk blijkt het gunstigste compromis bereikt te worden wanneer we horizontale en verticale afbuigspoelen een tegengesteld astigmatisme geven, zodat in de hoeken van het scherm de fouten van beide spoelenparen elkaar opheffen. Dit geeft dan wel in de middens van de zijden van het scherm enig astigmatisme.

Van ouds worden kleine correcties op het schaduwmasker en het fosforstippenpatroon in een laatste fase van het ontwerp experimenteel bepaald. Doordat we bij een 110°-buis door de grotere afbuighoeken echter gedwongen zijn de elektronenbanen voor de buitenrand van het scherm volledig te berekenen, kunnen we voor deze buis de vereiste correcties tevoren al vaststellen.

Een ander voordeel van het berekenen der buitenste elektronenbanen is, dat we de buitenomtrek van de ruimte die door de bundels bestreken wordt, nauwkeurig kennen. We zijn nu in staat de vorm van de glasballon daar ter plaatse zo te kiezen dat de afbuigspoelen zo dicht mogelijk bij de bundel komen te liggen. Hierdoor wordt de gevoeligheid van deze spoelen zo gunstig mogelijk, d.w.z. we kunnen de stromen die voor een bepaalde afbuiging nodig zijn, zo klein mogelijk maken.

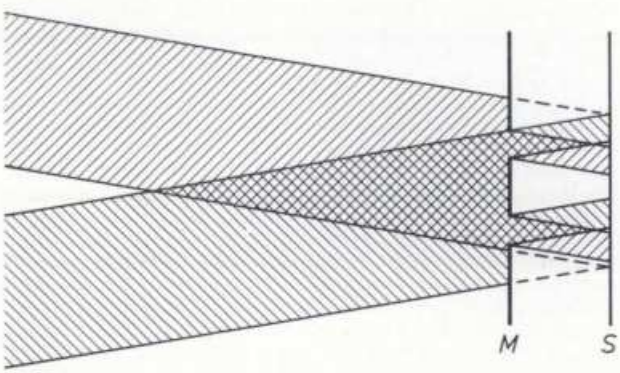


Fig. 13. Principe van de schaduwmaskerbuis. *M* schaduwmasker. *S* beeldscherm met fosforstippen. Slechts twee van de drie bundels zijn getekend, de derde bundel ligt buiten het vlak van tekening. Van de bundels, die op één plaats op het scherm geconvergeerd zijn, wordt slechts een deel door de gaatjes in het masker doorgelaten. Door het verschil in invalsrichting van de bundels treffen de doorgelaten bundeltjes verschillende fosforstippen.

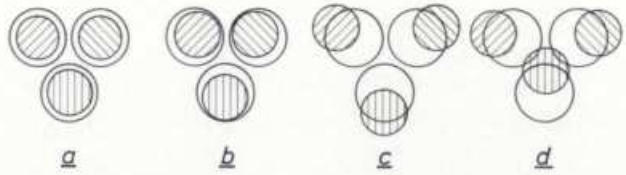


Fig. 14. Fosforstippen en landingsstippen van de elektronenbundels op het scherm. *a*) Ideale situatie: elke bundel treft een fosforstip juist in het midden. *b*) Nog net toelaatbare situatie. *c*) De landingsstippen vallen gedeeltelijk buiten de bijbehorende fosforstippen, maar vormen nog wel een gelijkzijdige driehoek. Deze situatie is te corrigeren door wijziging van de afstand tussen masker en scherm. *d*) Absoluut ongewenste situatie: de landingsstippen liggen niet meer op de hoekpunten van een gelijkzijdige driehoek en de situatie is niet meer te corrigeren door verandering van de afstand tussen masker en scherm.

De indexbuis

Dit type kleurenbeeldbuis (*fig. 15*) bevat slechts één elektronenkanon, waarvan de bundel weer een raster van horizontale lijnen schrijft op het scherm [8]. De drie kleurfosforen zijn nu niet in een stippenpatroon op het scherm aangebracht, maar in verticale strepen, gescheiden door even brede zwarte strepen.

De bundelstroom wordt afwisselend gemoduleerd met het rode, het groene en het blauwe kleursignaal. Na ieder tweetal kleurfosforlijnen is aan de binnenzijde, op een zwarte streep, een ultraviolet fluorescerende streep aangebracht, waarvan de fluorescentie buiten de beeldbuis wordt waargenomen met een fotomultiplicatorbuis. Het signaal van deze multiplicatorbuis geeft informatie over de plaats van het landingspunt van de bundel. Dit signaal wordt gebruikt voor synchronisatie van de bundelpositie en het op de bundel te moduleren videosignaal dat de informatie voor de weergave van de drie kleuren bevat.

Om te bereiken dat steeds maar één fosforlijn tegelijk door de bundel wordt getroffen, moet de stip in horizontale richting klein zijn. De verticale afmeting van de stip mag daarentegen niet te klein zijn, willen we voldoende lichtintensiteit verkrijgen zonder dat verzadiging van de fosforen optreedt. Dit is te bereiken door

[6] J. Haantjes en G. J. Lubben, Philips Res. Repts. **12**, 46, 1957 en **14**, 65, 1959.
[7] Zie hiervoor b.v. Electronic Appl. **30**, 33, 1970 (no. 1).
[8] Dit type beeldbuis is uitvoeriger beschreven, o.a. in E. F. de Haan en K. R. U. Weimer, Royal Telev. Soc. J. **11**, 278, 1967. G. J. Lubben, Onde Electr. **48**, 918, 1968 en P. M. van den Avoort, Onde electr. **48**, 921, 1968.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de bundel ter plaatse van het scherm niet een ronde maar een ellipsvormige doorsnede te geven.

Bovenstaande eis betekent dat we een astigmatische bundel moeten gebruiken en er dan voor moeten zorgen

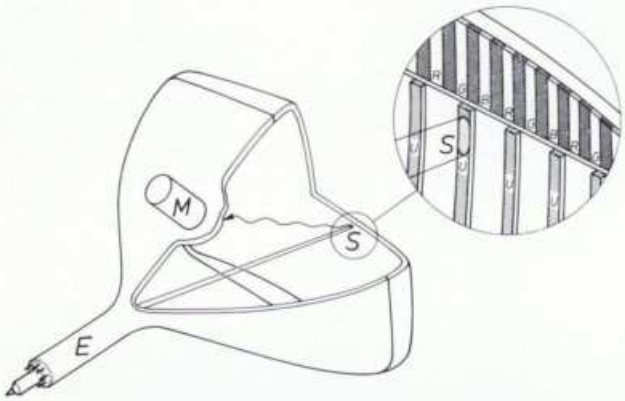


Fig. 15. De indexbeeldbuis voor kleurentelevisie. Het elektronenkanon E levert een bundel, waarvan de landingsstip S bij het schrijven van een beeldlijn achtereenvolgens de rode, groene en blauwe fosforstrepen R, G en B treft. U zijn ultravioletfosforstrepen. Wanneer de bundel deze strepen treft, ontstaan UV-flitsen die buiten de beeldbuis worden gedetecteerd met de fotomultiplicatorbuis M. De signalen van M dienen ter synchronisatie van de bundelbeweging en de op de bundel gemoduleerde helderheidsinformatie voor de drie kleuren.

dat het meridionale beeldvlak van de horizontale afbuigspoel en het sagittale beeldvlak van de verticale afbuigspoel samenvallen met het scherm.

We zullen hier, evenals in het voorgaande, alleen nagaan welke consequenties dit heeft voor de verticale afbuiging. De situatie voor de horizontale afbuiging is geheel analoog.

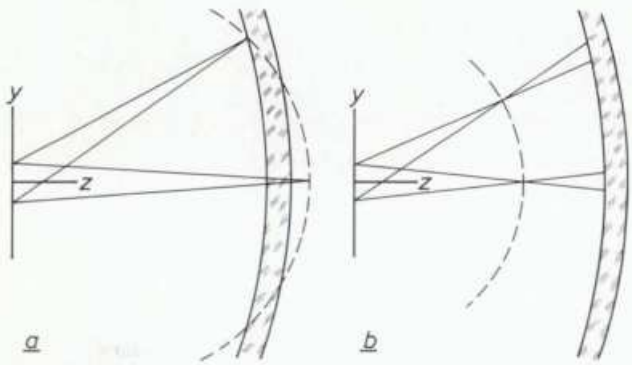


Fig. 16. Het beeldscherm van een indexbuis valt samen met het sagittale beeldvlak van de verticale afbuigspoelen. Snijdt het meridionale beeldvlak (streeplijn) het scherm (a), dan zal, doordat de kromming van het meridionale beeldvlak groter is dan die van het sagittale beeldvlak, langs de onder- en de bovenrand van het scherm het landingspunt cirkelvormig zijn. Hierdoor treedt plaatselijk overbelasting van de fosforen op. Ligt het meridionale beeldvlak geheel binnen de buis (b), dan wordt deze ongewenste toestand vermeden.

Heeft het scherm van een beeldbuis een kromtestraal van b.v. 1 m, dan zal dit dus ook de kromtestraal ϱ_s van het sagittale beeldvlak van de beschouwde spoel moeten zijn. We hebben gezien dat geldt: $1/(2\varrho_s) = B_5$, waarbij B_5 een van de coëfficiënten is uit de vergelijking (11) voor het landingspunt van een afgebogen elektronenbundel. We eisen nu dus van onze spoel dat de veldsterkteverdeling zodanig is dat $B_5 = \frac{1}{2}\,m^{-1}$. Door de samenhang die er tussen de coëfficiënten B blijkt te bestaan, heeft dit tot gevolg dat B_4, die, zoals we zagen, de kromming van het meridionale beeldvlak geeft, veel sterker dan 1 m^{-1} wordt. Een situatie als in *fig. 16a* is ongewenst, omdat daar beide beeldvlakken elkaar ergens op het scherm snijden. In de omgeving van deze doorsnijding gaat de ellips gaandeweg over in een cirkel en er zal daar dan verzadiging van de fosforen optreden, hetgeen aanleiding geeft tot kleurfouten.

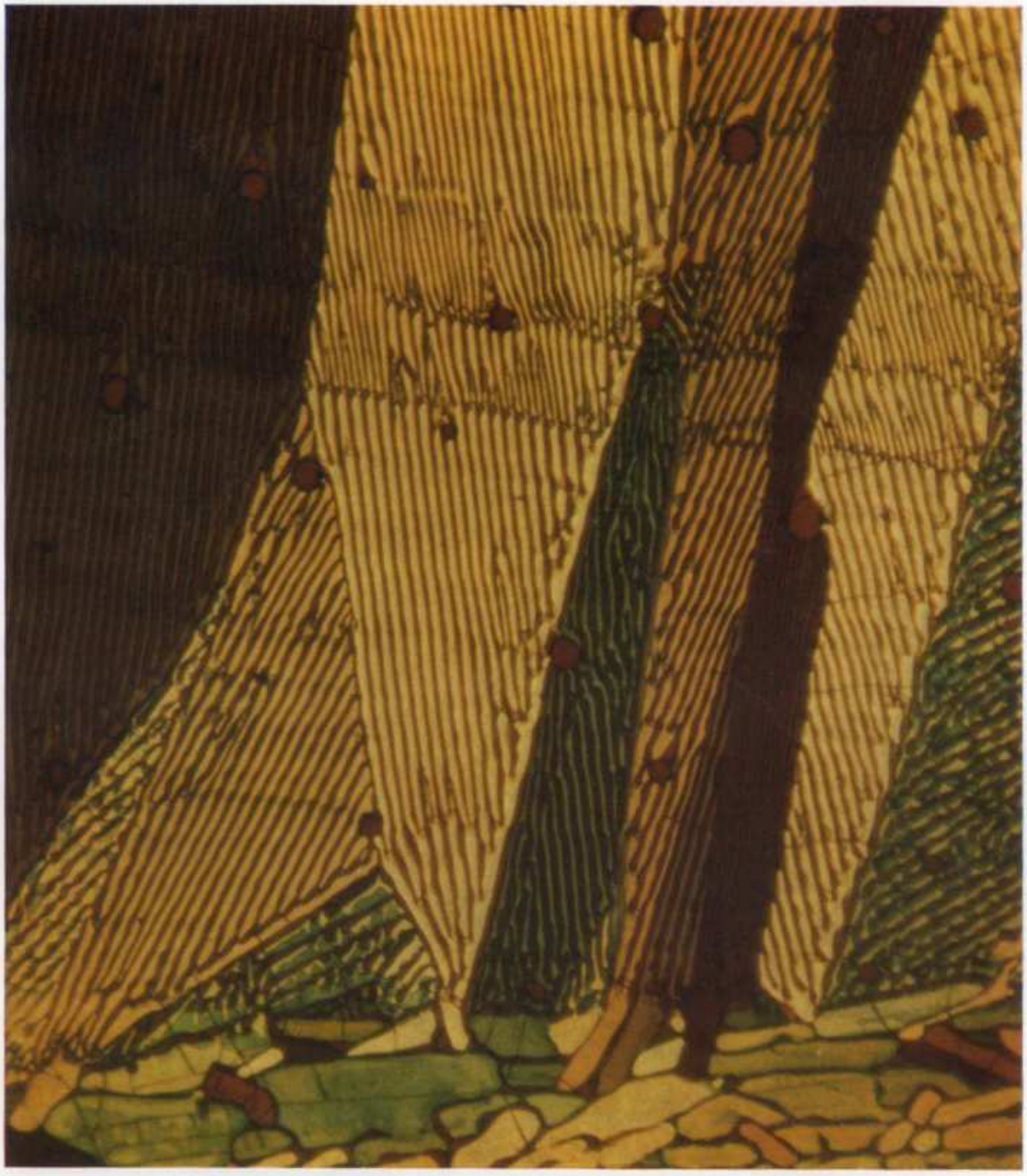
Het blijkt evenwel dat vorm en positie van de beeldvlakken onafhankelijk van elkaar zijn. We kunnen dus het meridionale beeldvlak geheel binnen de buis laten vallen zonder dat de kromming van dit beeldvlak verandert (fig. 16*b*). Snijpunten van de beeldvlakken zijn nu uitgesloten en de doorsnede van de bundel blijft overal op het scherm elliptisch.

Het zal uit deze voorbeelden duidelijk zijn dat elk buistype andere eisen stelt aan de bijbehorende afbuigspoelen. Voor een snel inzicht in de eigenschappen van bepaalde afbuigspoelen is de derde-ordebenadering een goed hulpmiddel. Voor een nauwkeuriger beschrijving moet de vijfde-ordebenadering worden gebruikt, terwijl voor grote afbuighoeken numerieke berekeningen van de elektronenbanen niet te vermijden zijn. Dankzij automatisering van de metingen en computerverwerking van de resultaten is dit laatste niet onoverkomelijk meer.

Samenvatting. De componenten van het magnetische afbuigveld in een televisiebeeldbuis zijn in reeksen rondom de as van de buis te ontwikkelen. De coëfficiënten die in deze reeksen optreden, zijn in principe eenvoudig te meten. De grootteverhoudingen der coëfficiënten maken echter zeer nauwkeurige metingen noodzakelijk, waarbij met profijt gebruik gemaakt wordt van computerverwerking van de meetgegevens. De eerste- en derde-ordebenadering van de oplossing van de bewegingsvergelijking voor een elektron in het afbuigveld worden gegeven; de samenhang tussen de coëfficiënten die in de derde-ordebenadering optreden en de verschillende beeldfouten wordt besproken. De vijfde-ordebenadering voor de oplossing wordt genoemd, doch vanwege zijn gecompliceerdheid niet uitgewerkt. Bij afbuiging van de elektronenbundel over hoeken groter dan 40° — zoals in de 110°-kleuren-televisiebuis — gaan de benaderingen niet meer op. De veldsterkte moet dan punt voor punt gemeten worden, waarna een numerieke oplossing van de bewegingsvergelijking voor de elektronen gevonden kan worden. Als voorbeeld van toepassingen van de hier behandelde meet- en rekenmethodes dienen de problemen die zich voordoen bij het ontwerpen van twee typen kleurenbeeldbuizen, de schaduwmasker- en de indexbuis.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Groei van „composieten" door gerichte stolling

Composieten zijn anisotrope materialen waarin twee (of eventueel meer) verschillende fasen volgens een periodiek patroon zijn gerangschikt, b.v. als lamellen of naalden.

Een composiet kan o.a. worden verkregen door gerichte stolling van een mengsel van eutectische samenstelling. Hiervoor is een vlak stollingsfront nodig dat een constante snelheid heeft (b.v. 10 cm/h). De zich uitscheidende fasen rangschikken zich dan vanzelf in een periodieke structuur (orde van grootte der periode 1 μm). Men vindt bepaalde verbanden, kenmerkend voor de composiet, tussen de groeirichting, de kristallografische richtingen van de fasen en de geometrie van de kristallen. De lamellen of naalden maken meestal een kleine hoek met de groeirichting.

In Philips' Natuurkundig Laboratorium onderzoekt men deze stollingsprocessen. Hiertoe wordt het stollingsfront, waar het kristalgroeiproces zich afspeelt, rechtstreeks geobserveerd met een microscoop, door een dunne laag (ca. 10 μm) gesmolten eutectisch mengsel tussen kwartsplaten met de juiste snelheid onder het objectief voort te schuiven in een stilstaand temperatuurveld; het stollingsfront staat dan eveneens stil ten opzichte van het objectief. Kiest men systemen waarin dubbelbrekende fasen voorkomen, dan kan men met behulp van polarisators verschillen in kristaloriëntatie zichtbaar maken als kleurverschillen.

Bovenstaande foto (vergroting 1200×) toont zo'n dunne laag na stolling. Het betreft hier het eutecticum van twee stoffen waarvan er één dubbelbrekend is en de andere (de overwegend bruine fase) niet. De gerichte stolling is begonnen bij de onderste polykristallijne laag. Men ziet dat bij het naar boven bewegen van het stollingsfront vanuit kiemkristallen in de oorspronkelijke structuur een aantal gebieden zijn gegroeid die elk hun eigen, typische lameloriëntatie vertonen. Gedurende het stollingsproces worden sommige gebieden geleidelijk door andere verdrongen (competitive growth), zodat er uiteindelijk maar enkele overblijven. Iets boven het midden ziet men de sporen van fluctuaties in de groeisnelheid, waardoor lamellen werden gesplitst.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Philips techn.T.32,74-79,1971,no.3

Analyse en synthese van handschrift

J. Vredenbregt en W. G. Koster

Hoewel ontwerpers van apparatuur voor het automatisch lezen van handschrift er misschien hun voordeel mee kunnen doen, was dit niet het eerste doel van het hier beschreven onderzoek. Veeleer moet het artikel geplaatst worden in het kader van een meer algemene studie van de motoriek van het menselijk lichaam, die wordt uitgevoerd in het Instituut voor Perceptieonderzoek (IPO) te Eindhoven. Aan de hand van het schrijfproces bestudeert men de programmering van de spieractiviteit in relatie met de tot stand gebrachte beweging.

Iedere beweging die de mens maakt, komt tot stand door nauwkeurige samenwerking van een aantal spieren. Wanneer een beweging over slechts één gewricht wordt uitgevoerd, spreekt men van een enkelvoudige beweging, anders van een samengestelde. Het schrijfproces is een voorbeeld van een samengestelde beweging. Het wordt gestuurd door een aantal volgens een programma geactiveerde spiergroepen, die de bewegingen van onderarm, hand en vingers bewerkstelligen. Men kan er vrijwel alle aspecten van de motoriek van het menselijk lichaam in terugvinden. Daarom is, als logische voortzetting van het onderzoek aan spieren dat reeds jaren in het Instituut voor Perceptieonderzoek (IPO) wordt verricht [1], en voortbouwend op werk van Denier van der Gon [2] en van MacDonald [3], een onderzoek opgezet naar het tot stand komen van handschrift [4]. Van de bestudering van het statische en dynamische gedrag der spieren tijdens het schrijven mag men verwachten dat deze niet alleen een beter inzicht geeft in het schrijfproces zelf, maar ook in de regels die ten grondslag liggen aan de programmering van samengestelde bewegingsprocessen. Dit kan van nut zijn bij de ontwikkeling van bekrachtigde en bestuurbare kunstledematen en bij uitwendige stimulering van spieren [5].

De methodologische grondslag van dit spieronderzoek is te vergelijken met die van het fonetisch onderzoek in het IPO: er is een apparaat geconstrueerd voor het analyseren van het verschijnsel — hier dus het schrijfproces — en een tweede apparaat, dat de schrijffunctie van de hand nabootst en waarmee letters kunnen worden gesynthetiseerd. Men kan van de ene letter overgaan op een andere en ook kleine verschillen in één letter realiseren, uitsluitend door de tijdparameters te veranderen. De mogelijkheid van synthese van letters wijst erop dat het aan het apparaat ten grondslag liggende model niet onjuist is.

J. Vredenbregt en ir. W. G. Koster, medewerkers van het Instituut voor Perceptieonderzoek, Eindhoven.

Analyse van de schrijfbeweging

De handschriftanalysator die wij hebben geconstrueerd, is een apparaat voor het registreren van een zg. bewegingsdiagram, dat is een curve die de plaats van de pen geeft als functie van de tijd. Bij het ontwerpen ervan hebben we de schrijfbeweging beschouwd als te zijn samengesteld uit twee afzonderlijke bewegingen: een beweging in de schrijfrichting — die wij een beweging in de x-richting zullen noemen — en een in de richting loodrecht daarop — de y-richting. De eerstgenoemde beweging geschiedt door draaiing van de hand vanuit de pols, door draaiing van de onderarm vanuit de elleboog of door translatie van de onderarm. De beweging loodrecht (of enigszins schuin) op de schrijfrichting wordt verzorgd door de duim, de wijsvinger en de middelvinger; soms ook door de gehele onderarm. Behalve deze twee bewegingen is er natuurlijk nog een derde, waarbij de pen van het papier wordt gelicht of er weer naar toe wordt gebracht, maar deze kan hier buiten beschouwing blijven.

Wij hebben bij de analyse van de schrijfbeweging voornamelijk aandacht besteed aan de verplaatsingen in de y-richting, omdat deze groter zijn dan de ver-

[1] J. Vredenbregt en W. G. Koster, Some aspects of muscle mechanics in vivo, IPO Annual Progress Report **1**, 94-100, 1966. J. Vredenbregt en W. G. Koster, Measurements on electrical and mechanical activity of the elbow flexors, Biomechanics I, 1st Int. Seminar, Zürich 1967, blz. 102-105 (Karger, Bazel/New York 1968).

[2] J. J. Denier van der Gon en J. Ph. Thuring, Kybernetik **2**, 145, 1965.

[3] J. S. MacDonald, Quart. Progress Rep. M.I.T.-R.L.E. **76**, 210, 1965.

[4] Zie ook J. Vredenbregt en W. G. Koster, Analysis and synthesis of handwriting, IPO Annual Progress Report **2**, 157-161, 1967. J. Vredenbregt, W. G. Koster en J. W. Kirchhof, On the tolerances in the timing programme of synthesised letters, *ibid.* **3**, 95-97, 1968. W. G. Koster en J. Vredenbregt, Analysis and synthesis of handwriting, Biomechanics II, 2nd Int. Seminar, Eindhoven 1969, blz. 77-82 (Karger, Bazel/New York 1971).

[5] Zie b.v. H. J. van Leeuwen en J. Vredenbregt, Een spierstimulator voor sleepvoet-patiënten, Philips techn. T. **30**, 23-24, 1969.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

plaatsingen in de x-richting en deze laatste bovendien veel gecompliceerder zijn. Uit voorstudies was overigens reeds gebleken dat verdere bestudering van de beweging in de x-richting niet méér gegevens zou opleveren dan die in de y-richting.

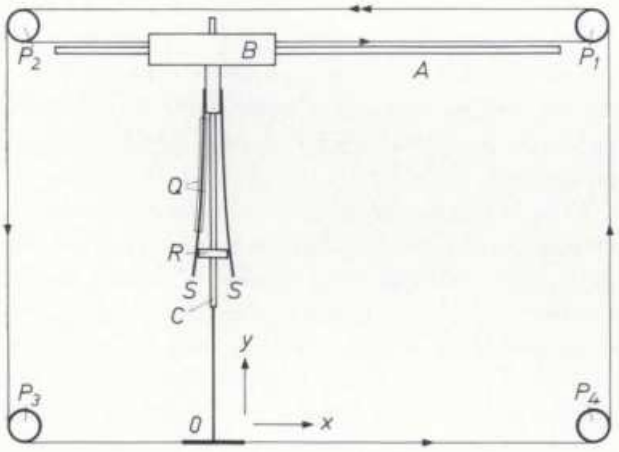


Fig. 1. Apparaat voor registratie van de schrijfbeweging. O plaats van de pen. Bewegingen in de schrijfrichting (de x-richting) worden door middel van een nylondraad overgebracht op het blok B, dat langs de geleidingsas A kan schuiven. Bewegingen dwars op de schrijfrichting (de y-richting) worden via de as C, waarop een schijf R is bevestigd, overgebracht op twee bladveren S, die daardoor meer of minder uitbuigen. Q rekstrookjes, waarvan een spanning wordt afgenomen die vrijwel evenredig is met de uitwijking van de pen.

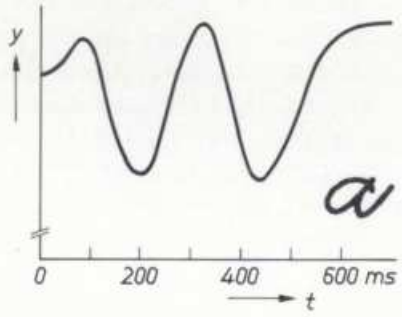


Fig. 2. Bewegingsdiagram, dat is de verplaatsing van de pen als functie van de tijd, voor bewegingen dwars op de schrijfrichting bij het schrijven van de afgebeelde letter a.

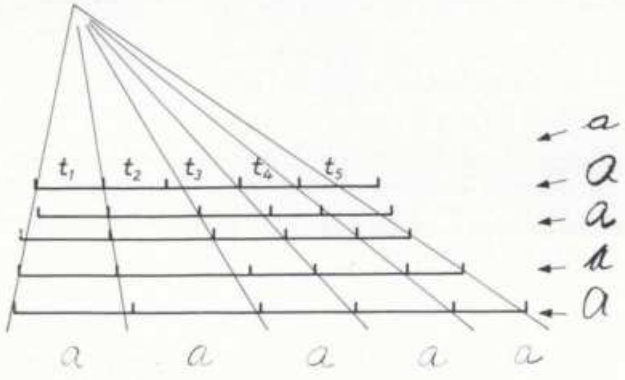


Fig. 3. De letter a, geschreven door vijf proefpersonen, met een verdeling van de schrijftijd in intervallen t_1-t_5. De intervallen worden gemarkeerd door de tijdstippen waar de y-component van de beweging blijkens de bewegingsdiagrammen van richting omkeert. De verhouding tussen deze intervallen is bij de vijf proefpersonen ten naaste bij dezelfde.

Fig. 1 toont een schematische afbeelding van het apparaat met behulp waarvan de y-coördinaat van de schrijfbeweging van de zich in punt O bevindende pen als functie van de tijd langs elektromechanische weg kan worden geregistreerd. Het elektrische signaal dat een maat is voor de verplaatsing in de y-richting, is de spanning over de rekstrookjes Q, die op een der bladveren S zijn geplakt. Afhankelijk van de verplaatsing van de pen worden namelijk de bladveren door de schijf R meer of minder uitgebogen, waardoor de weerstand van de rekstrookjes varieert.

De constructie van het apparaat is zo licht mogelijk gehouden, omdat de massa van de bewegende delen anders de registratie te veel zou beïnvloeden. Verplaatsing van de pen in de x-richting is mogelijk doordat het zojuist besproken detectiesysteem voor de y-coördinaat in zijn geheel langs een geleidingsas A verplaatsbaar is. De bewegingen in het apparaat geschieden vrijwel zonder wrijving, doordat er tussen het blok B en de as A, alsmede daar waar de as C door een gat in het blok B gaat, een luchtkussen in stand wordt gehouden. Om te zorgen dat het blok B niet schrankt wanneer het zich langs de as verplaatst, wordt de verplaatsing van O in de x-richting op B overgebracht door middel van een dunne nylondraad die over vier rollen is geleid, waarbij tweemaal om de rollen P_1 en P_2.

De frequentiekarakteristiek van het analysesysteem is zodanig dat signalen met amplitudes die men in handschrift aantreft, tot 25 Hz onvervormd worden weergegeven. In het frequentiegebied beneden 25 Hz treedt tussen ingangs- en uitgangssignaal geen fasedraaiing op. De in handschrift voorkomende frequenties liggen beneden 15 Hz. In *fig. 2* ziet men als voorbeeld het bewegingsdiagram voor de y-richting van de afgebeelde letter a.

Een fundamentele vraag waarop onze analyse van lopend handschrift antwoord zou kunnen geven, luidt: zijn er aan de bewegingsdiagrammen die men registreert als verschillende personen een zelfde letter schrijven, algemene wetmatigheden te onderkennen die niet samenhangen met de persoon van de schrijver? De tot nu toe verkregen resultaten wijzen erop dat dit inderdaad het geval zou kunnen zijn. In *fig. 3* ziet men vijf letters a die door vijf proefpersonen zijn geschreven met de pen van het zojuist beschreven analyse-apparaat. Deze letters zijn duidelijk verschillend van vorm. De bijbehorende bewegingsdiagrammen, die betrekking hebben op de y-richting, wijzen niettemin op een zekere wetmatigheid in de tijdselementen die de proefpersonen voor het schrijven van opeenvolgende delen van een letter nodig hebben. Verdeelt men namelijk de totale voor het schrijven van een letter vereiste tijd in inter-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

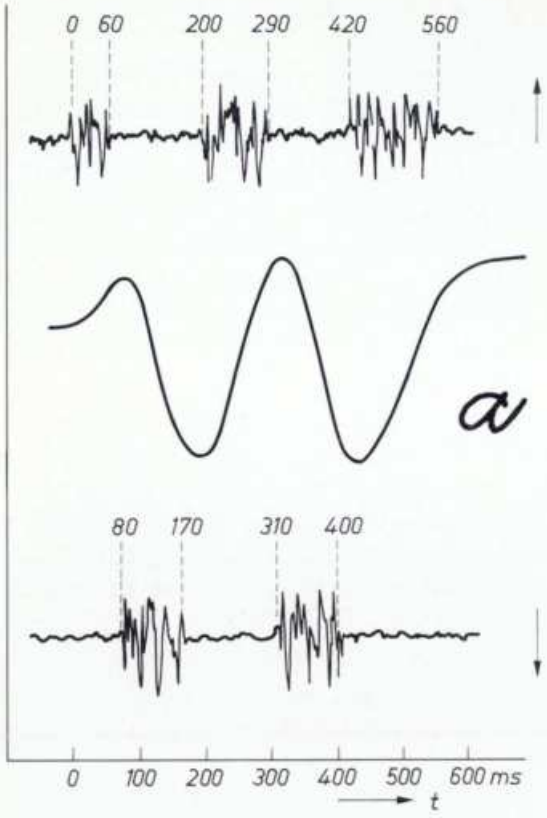


Fig. 4. Bewegingsdiagrammen voor de beweging dwars op de schrijfrichting en de bijbehorende elektromyogrammen, geregistreerd tijdens het schrijven van de afgebeelde letter *a*.

vallen van gelijke bewegingsrichting — dat wil zeggen: geeft men op een tijdas de punten aan waarop de beweging in de *y*-richting van teken omkeert —, dan hebben deze intervallen voor alle personen ongeveer dezelfde verhouding. Dit blijkt ook voor andere letters het geval te zijn. Ondanks individuele verschillen in lettervorm is deze verhouding dus meer karakteristiek voor de letter dan voor de schrijver. Een zelfde wetmatigheid vindt men ook terug wanneer één persoon een bepaalde letter met verschillende snelheden en in verschillende grootten schrijft.

Wij willen nu eerst wat nader ingaan op de wijze waarop skeletspieren dergelijke bewegingen tot stand brengen. Men onderscheidt de *agonist*, die voor de beweging in een bepaalde richting zorgt, en de *antagonist*, die voor de beweging in de tegenovergestelde richting zorgt. Als een agonist zich samentrekt, wordt het daarbij betrokken lichaamsdeel in beweging gebracht en versneld, zolang deze spier ten gevolge van zijn activiteit een kracht uitoefent. Gedurende deze beweging wordt de antagonist passief gerekt, hetgeen energie kost en dus de beweging remt. Bovendien zijn bij snelle bewegingen de activiteiten van de agonist en de antagonist niet onafhankelijk van elkaar. Wanneer de activiteit ophoudt, gaat de beweging nog enige tijd door wegens de traagheid van de spier en de massatraagheid van het lichaamsdeel. Wanneer de antagonist zich samentrekt, keert de beweging van richting om.

Men kan gemakkelijk constateren of een spier wel of niet actief is, en in welke mate, doordat spieractiviteit gepaard gaat met een elektrisch verschijnsel. Dit verschijnsel vindt zijn oorzaak in een ionenuitwisseling aan de membranen die de spiercellen omhullen, en is aan de huid met behulp van oppervlakte-elektrodes als variërend potentiaalverschil waar te nemen (elektromyografie).

In *fig. 4* zijn de tijdens het schrijven van een letter *a* geregistreerde bewegingsdiagrammen weergegeven met de bijbehorende elektromyogrammen. Rechts van de elektromyogrammen is met een pijl de bewegingsrichting aangegeven waarop de verschillende spieractiviteiten betrekking hebben. Een vergelijking tussen het bewegingsdiagram en de bijbehorende spieractiviteiten laat zien dat de spieractiviteit volgens het elektromyogram meestal korter duurt dan de daardoor opgeroepen beweging en op die tijdstippen begint waarop de beweging moet beginnen, moet worden afgeremd of van richting moet worden veranderd. Bij dit soort „aangeleerde" bewegingen zijn agonist en antagonist slechts zelden gelijktijdig actief.

Resultaten als het bovenstaande leiden tot het volgende model van het schrijfproces. Men kan het schrijven vergelijken met de werking van een mechanisch systeem dat een zekere massatraagheid heeft en dat bestuurd wordt door bekrachtiging gedurende een aantal periodes van ongelijke duur. De grootte van de uitgeoefende kracht, en daarmee de amplitude van de beweging, wordt daarbij meer bepaald door de duur dan door de sterkte van de bekrachtiging.

Synthese van letters

Een simulator voor het schrijven van letters

Om dit model van het schrijfproces te toetsen, hebben wij een elektromechanisch apparaat gebouwd dat de zojuist genoemde eigenschappen heeft en dat ook alle voor het schrijven relevante mechanische mogelijkheden en beperkingen van de hand bezit (*fig. 5*). Met dit apparaat kan inderdaad schrift geproduceerd worden.

Als krachtbronnen worden vier gelijkstroommotoren gebruikt, met een in- en uitschakelkarakteristiek die sterk overeenkomt met die van skeletspieren. Deze motoren zijn twee aan twee mechanisch gekoppeld; één paar verzorgt de beweging van de schrijfstift in de beide *x*-richtingen, het andere paar de beweging in de beide *y*-richtingen. Door de koppeling werkt de ene motor van een paar als „agonist" en de andere als „antagonist". Wordt namelijk de ene motor elektrisch be-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

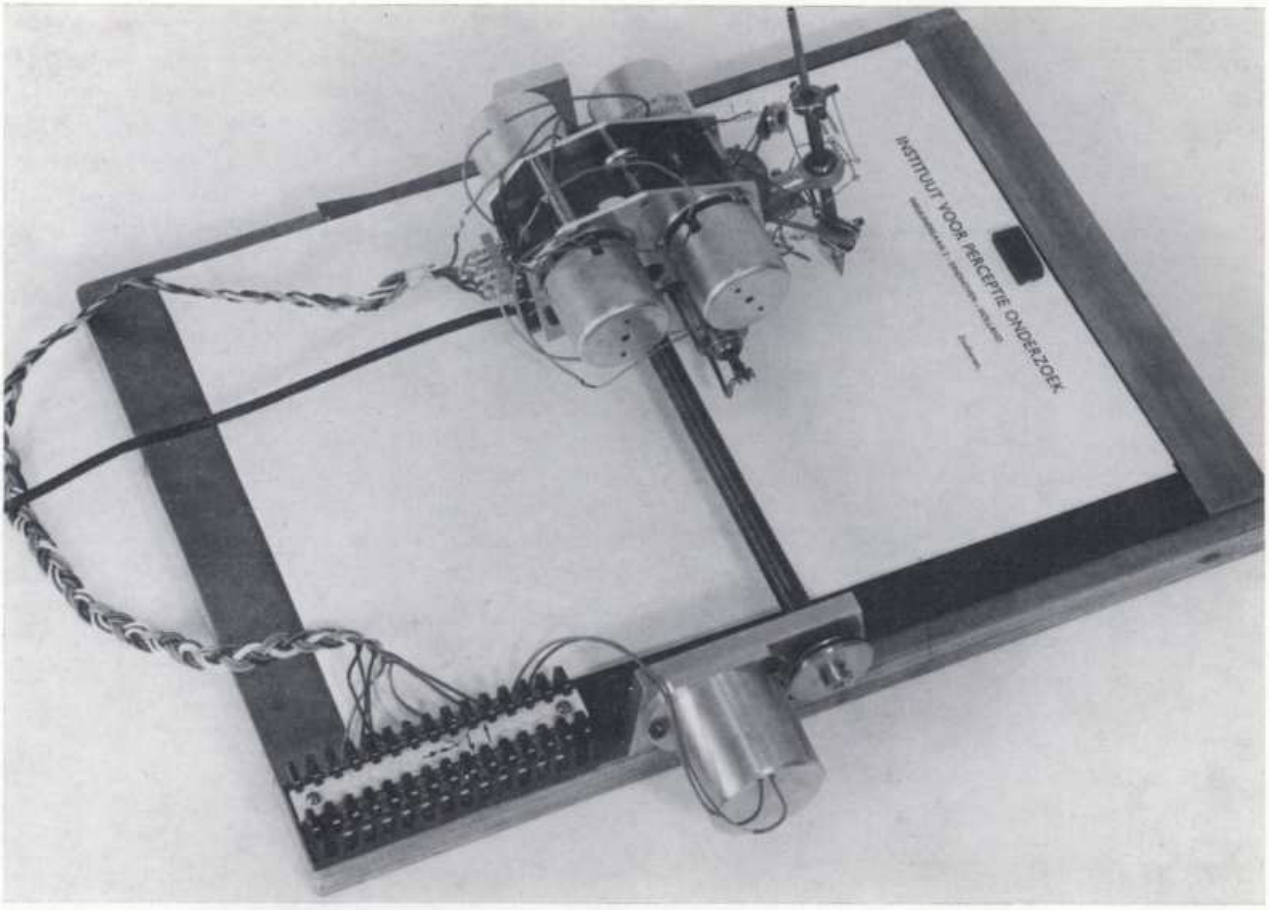


Fig. 5. Simulator voor het nabootsen van lopend handschrift. Twee mechanisch gekoppelde gelijkstroommotoren zorgen voor verplaatsing van de pen in de schrijfrichting, twee andere voor verplaatsing in de richting loodrecht daarop. Het geheel kan nog in de schrijfrichting worden verplaatst door middel van een draadspil. De pen kan van het papier worden gelicht met een elektromagneet.

krachtigd, dan werkt de andere als generator, en doordat de gegenereerde energie wordt gedissipeerd, wordt de beweging van het systeem gedempt (*fig. 6*). De niet-bekrachtigde motor vervult aldus de rol van passief gerekte antagonist. De voor de simulatie vereiste massatraagheid wordt gevormd door het anker van de motor, de schrijfstift en de overige bewegende delen. De algehele translatie van hand en onderarm langs de regel wordt nagebootst door middel van een draadspil, het oplichten van de pen geschiedt door een elektromagneet.

De motoren worden alle vier afzonderlijk gevoed met impulsen van gelijke en in de tijd constante spanning en wel volgens een programma dat karakteristiek is voor de te schrijven letter. Voor de letter *a* is dit schematisch weergegeven in *fig. 7*. De grootte van de bekrachtiging — i.c. de voedingsspanning — wordt daarbij zo ingesteld dat de maximale snelheid waarmee de pen beweegt, zowel in de verticale als in de horizontale richting gelijk is aan de werkelijk optredende snelheid van de schrijfstift tijdens het schrijven met de hand.

Het programma van de bekrachtiging van de motoren wordt van te voren ingesteld met behulp van een elektronisch apparaat [6] dat op de juiste momenten de commando's voor de bekrachtigingsimpulsen af-

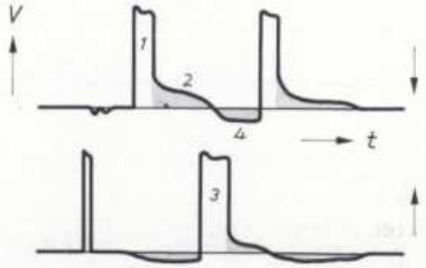


Fig. 6. Het verloop van de klemspanningen van twee mechanisch gekoppelde motoren. De bekrachtigingsimpulsen van beide motoren zijn niet-gearceerd weergegeven (b.v. de impuls *1*). Het gearceerde gebied *2* toont het verloop van de spanning die wordt gegenereerd wanneer de motor uitloopt onder invloed van zijn massatraagheid. Wordt nu de andere motor bekrachtigd (impuls *3*), dan gaat de eerste motor in tegengestelde richting draaien en wordt er dus een negatieve klemspanning gegenereerd (gebied *4*). De in de gearceerde periodes gegenereerde energie wordt in een weerstand gedissipeerd, waardoor het systeem wordt gedempt.

[6] G. J. J. Moonen en C. A. Lammers, A preset cascade counter, IPO Annual Progress Report **1**, 104-106, 1966.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

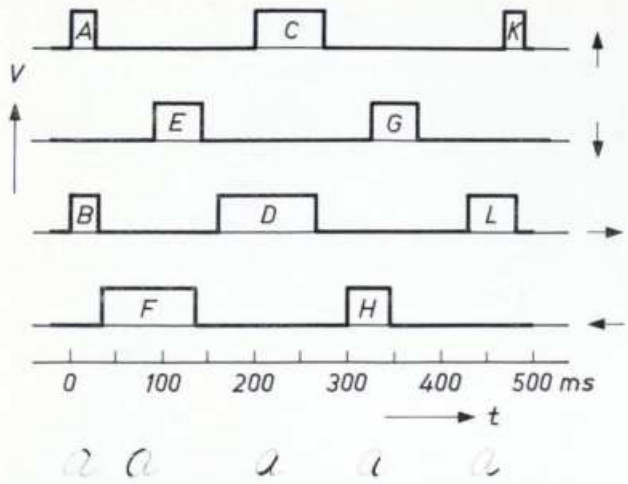


Fig. 7. Een tijdsprogramma voor de synthese van een letter *a*. Verticaal is schematisch de voedingsspanning van de vier motoren uitgezet. De verschillende excitatieperiodes zijn met letters aangeduid, de richting waarin de desbetreffende motor de pen laat bewegen met een pijl. De met de periodes corresponderende delen van de letter zijn onder het programma weergegeven.

Tijdsprogramma van letters

Uit de vorm van een letter en de wijze waarop deze letter bij het schrijven met de hand tot stand komt, is de volgorde waarin de motoren van de simulator bekrachtigd moeten worden, af te leiden. Moment en duur van de bekrachtiging moeten door proberen worden vastgesteld, waarbij de natuurlijkheid van de geproduceerde letter als maatstaf geldt voor de juistheid van het programma. Gebruik makend van de uit de analyse verworven kennis werd al spoedig een zekere vaardigheid verkregen in het programmeren.

In *fig. 8* ziet men enige door de simulator geschreven letters, met voor ieder de variatie van de klemspanningen van de motoren en het bewegingsdiagram van de pen. Men ziet dat, overeenkomstig de spieractiviteit tijdens het schrijven, korte tijd na het inschakelen van de bekrachtiging van de motor de bewegingsrichting van teken omkeert, en dat na het uitschakelen de beweging van de pen nog doorgaat door de traagheid van

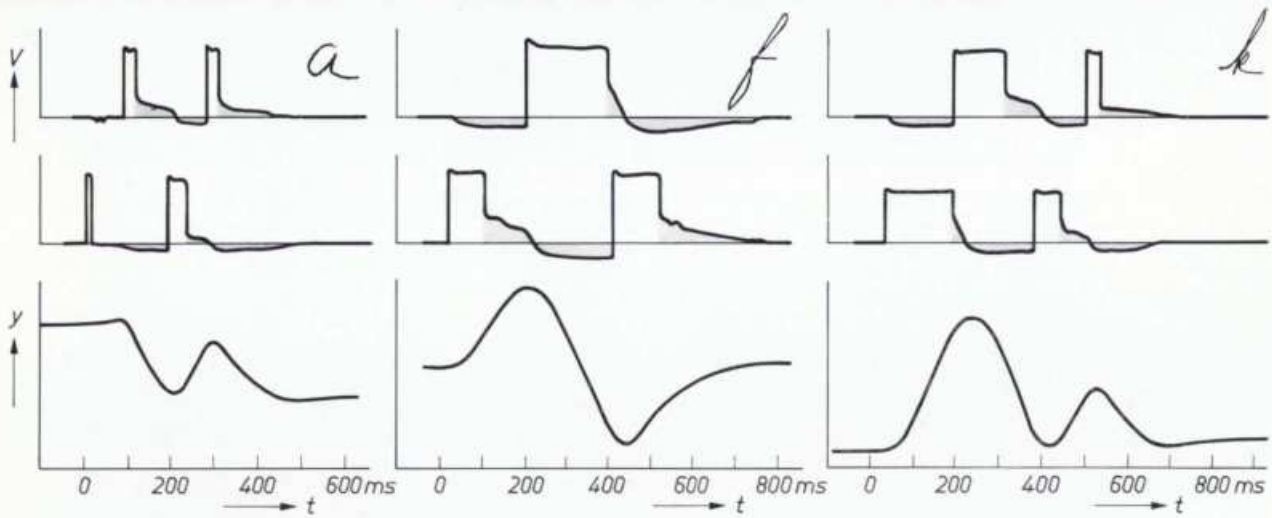


Fig. 8. Enige door de simulator nagebootste letters, met de bewegingsdiagrammen alsmede grafieken van de klemspanningen van de motoren als functie van de tijd. In de gearceerde periodes werken de motoren als generator.

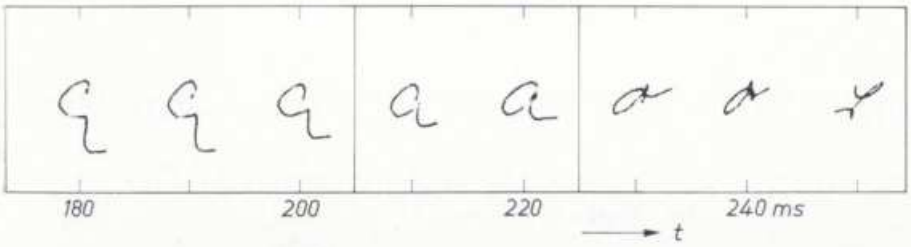
Fig. 9. Nabootsingen, twee per geval, van vier van de vijf letters *a* van figuur 3. Het verschil in vorm werd bereikt door kleine veranderingen van het tijdsprogramma van de simulator.

geeft. Dit apparaat heeft verscheidene uitgangskanalen; de geprogrammeerde keuze van het uitgangskanaal bepaalt welke motor wordt bekrachtigd. Het moment van de bekrachtiging kan met stappen van 1 ms worden gevarieerd. Het is mogelijk de periodes van bekrachtiging der motoren elkaar te doen overlappen.

het systeem. In *fig. 9* vindt men een aantal nabootsingen van verschillende letters *a* uit fig. 3. Men ziet dat deze nabootsingen zeer getrouw zijn. De onderlinge verschillen, die het handschrift zijn „persoonlijk" karakter geven, konden worden verkregen door middel van relatief kleine verschillen in begintijd en duur van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



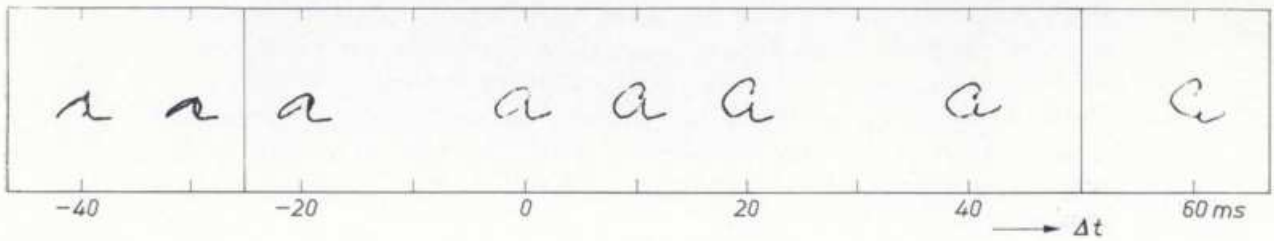


Fig. 10. Variaties van ca. 20 ms in tijdstip of duur van de bekrachtiging leveren reeds verminkte letters op. Bij de bovenste serie werd het beginpunt t van de bekrachtigingsperiode C (zie fig. 7) gevarieerd; het eindpunt was gefixeerd op hetzelfde tijdstip als in fig. 7 (275 ms). Bij de onderste serie was de lengte van de periode C constant, maar de positie werd gevarieerd. De tijd Δt is de verschuiving ten opzichte van de positie in fig. 7 (t = 220 ms).

de periodes van bekrachtiging der motoren.

Verandert men de tijdseenheid van de elektronische programmaschakelaar, dan worden alle onderdelen van het programma evenredig langer of korter, wat resulteert in een grotere of kleinere letter van overigens vrijwel gelijke vorm. Men kan echter niet ongestraft doorgaan met het veranderen van de tijdseenheid, omdat de massatraagheid van het systeem, die mede van invloed is op de vorm van de letter, niet verandert.

Een interessant gegeven werd nog verkregen door de motoren een bepaalde voorspanning te geven. In dit geval zijn de condities te vergelijken met een verhoogde spierspanning waardoor zich een vorm van verkrampt schrijven voordoet. De aldus nagebootste letters zijn niet vloeiend, en zien eruit alsof zij door iemand met een gebrekkige bewegingscoördinatie (licht spastisch) geschreven zijn.

Uit het onderzoek is ten aanzien van de leesbaarheid van de letters gebleken dat in het programma de tolerantie voor een verschuiving van een periode van bekrachtiging langs de tijdas zeker twee maal zo groot is als de tolerantie voor een verandering van zijn duur. De meest gevoelige periodes van bekrachtiging in het programma van de letter *a* (fig. 7) blijken te zijn C, E en G. De periodes C en E zijn van directe invloed op het ovaal van de *a*, met name daar waar dit behoort te sluiten en de neerhaal begint. De periode G bepaalt hoofdzakelijk de lengte van deze neerhaal. In het algemeen kan men zeggen dat veranderingen van 20 ms in de duur van de bekrachtiging reeds aanzienlijk verminkte letters kunnen opleveren (*fig. 10*).

Uit de beschreven onderzoekingen kunnen wij concluderen dat het mogelijk is natuurlijk lijkend handschrift na te bootsen door middel van een systeem waarvan de mechanische parameters constant zijn en slechts de tijdparameters van het bekrachtigingssignaal worden gevarieerd. Dat de letters ook op soortgelijke wijze worden geproduceerd als bij het schrijven, blijkt uit de gelijkenis tussen het bewegingsdiagram van de simulatie en dat van de handbeweging, alsmede uit de overeenkomst tussen het patroon van de bekrachtigingsimpulsen waarmee de simulator wordt aangedreven en dat van de elektromyografische signalen die bij het schrijven met de hand worden geregistreerd.

Aangezien bij de simulatie afwijkingen van 5-10 ms reeds veranderingen in de letter te zien geven, is het aannemelijk dat ook de spieren met een zelfde nauwkeurigheid worden gestuurd.

Samenvatting. Als een van de onderwerpen voor de studie van de spieractiviteit bij het uitvoeren van samengestelde bewegingen is het schrijfproces gekozen. Er is een apparaat geconstrueerd waarmee tijdens het met de hand schrijven van letters bewegingsdiagrammen (verplaatsing als functie van de tijd) zijn geregistreerd. Deze diagrammen correleren goed met gelijktijdig opgenomen elektromyogrammen, die een beeld geven van de spieractiviteit. Men kan het schrijfproces vergelijken met de werking van een mechanisch systeem dat een zekere massatraagheid heeft en dat bestuurd wordt door constante bekrachtiging gedurende een aantal periodes van ongelijke duur. Op grond hiervan is een simulator gebouwd waarmee letters geschreven kunnen worden. Deze bestaat uit twee paar gelijkstroommotoren die een pen in onderling loodrechte richtingen heen en weer kunnen bewegen. De motoren worden volgens een bepaald programma bekrachtigd met een constante spanning. Wijzigingen van 5 à 10 ms in het voor een letter karakteristieke programma veroorzaken veranderingen in de letter die overeenkomen met de persoonlijke verschillen in handschrift, wat aannemelijk maakt dat ook spieren met een dergelijke nauwkeurigheid gestuurd worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

„Intertrapsbesturing", een nieuw besturingsprincipe voor instelbare frequentiedelers

G. Kaps

Frequentiedeling geniet de liefde van menig meet- en regeltechnicus, niet in de laatste plaats doordat de moderne digitale bouwstenen velerlei toepassingen ervan veroorloven en andere vergemakkelijken. Zo is frequentiedeling evenzeer van nut voor de regeling van het toerental van motoren als voor debietmetingen bij chemische processen.

Door een nauwkeurige analyse van de conventionele multitraps-deelschakelingen kwam de auteur tot een nieuw soort inwendige besturing ervoor. Zijn „intertrapsbesturing" onderdrukt goeddeels de impulspakkettering, die in de bestaande schakelingen de meetresultaten dikwijls vervalst.

Frequenties delen: waarom en hoe?

Bij allerlei meet- en regeltechnische processen transformeert men grootheden in periodieke impulssignalen. De frequentie van een dergelijk signaal, die dan als maat voor de oorspronkelijke grootheid optreedt, is veel minder gevoelig voor storingen dan een analoog signaal. Daarbij komt nog dat frequenties met de moderne digitale apparatuur zeer nauwkeurig gemeten en ook gemakkelijk verder verwerkt kunnen worden. Men gebruikt hierbij dikwijls deelschakelingen, d.w.z. schakelingen die frequenties verlagen door deling. Een instelbare deelschakeling kan, bij voorbeeld, een signaal met een vaste standaardfrequentie transformeren in signalen met lagere frequentie. Daarmee beschikt men over een variabele frequentiestandaard, wat in vele frequentieregelingen vereist is. Ook laat men deelschakelingen de frequenties die meetresultaten voorstellen, zodanig veranderen dat de nieuwe frequenties als getal gelijk zijn aan de gemeten grootheden uitgedrukt in meer gebruikelijke eenheden. Dit soort verandering van frequentie heet schaaltransformatie. Schakelingen voor schaaltransformatie worden veelvuldig in de chemische procesindustrie gebruikt. Bij de meting van, bij voorbeeld, een doorstroomsnelheid kan de schakeling de frequentie van het impulssignaal delen door het gehele getal dat gelijk is aan het aantal impulsen corresponderend met één liter/minuut. Dit aantal noemt men de schaalfactor. De nieuwe frequentie geeft dan de doorstroomsnelheid uitgedrukt in l/min.

Er bestaan twee soorten deelschakelingen.

Dipl.-Ing. G. Kaps, medewerker van Philips' Hoofdindustriegroep Medical Systems, Eindhoven, destijds verbonden aan Philips Forschungslaboratorium Hamburg GmbH.

Een „echt" delende schakeling telt de binnenkomende impulsen en verdeelt ze in gelijke, opeenvolgende groepen. Telkens na het binnenkomen van zo'n groep wekt de schakeling één uitgangsimpuls op, zodat de frequentie van het uitgangssignaal gelijk is aan die van het ingangssignaal gedeeld door het aantal impulsen per groep.

De zogenaamde digitale vermenigvuldigschakelingen vormen de tweede soort; zij laten van een periodiek ingangssignaal een bepaald deel passeren, bij voorbeeld M impulsen van telkens 1000 impulsen, en blokkeren de rest. De frequentie van het uitgangssignaal is dan gelijk aan die van het ingangssignaal vermenigvuldigd met $M \times 10^{-3}$. Het (gehele) getal M is instelbaar en kleiner dan 1000. Een dergelijke schakeling „vermenigvuldigt" een frequentie met een getal kleiner dan één, wat de naam verduidelijkt.

De vermenigvuldigschakelingen worden in de praktijk het meeste toegepast, o.a. vanwege hun ruime instelbaarheid. Zo kan men b.v. bij een serieschakeling van drie decimale delers elke decimale breuk met drie cijfers achter de komma als vermenigvuldigingsfactor kiezen.

De genoemde „echte" deelschakelingen hebben het bezwaar dat slechts de gehele getallen als schaalfactor optreden. Bovendien daalt bij grote schaalfactoren het scheidend vermogen van een meting ontoelaatbaar. Als, bij voorbeeld, een detector bij de meting van een doorgestroomd volume 2364 impulsen per 1000 liter opwekt en men werkt met een schaalfactor 2364, dan is de kleinste afleesbare verandering van het doorgestroomde volume maar liefst 1000 liter. Naast dit

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

principiële bezwaar moet nog opgemerkt worden dat de bouw van een „echt" delende schakeling met zo'n grote schaalfactor als 2364 niet eenvoudig is.

De digitale vermenigvuldigschakeling, daarentegen, zou in het genoemde voorbeeld een duizend maal beter scheidend vermogen kunnen toelaten. Door de schakeling namelijk zo in te stellen dat van telkens 1000 impulsen er 423 passeren, verkrijgt men een uitgangssignaal van 1000 impulsen per 1000 liter (de breuken 1000/2364 en 423/1000 zijn in goede benadering gelijk). Veranderingen van één liter worden dan constateerbaar, mits de uitgangsimpulsen regelmatig verschijnen. Het verkrijgen van deze regelmaat vormt juist het probleem dat de in dit artikel te behandelen „intertrapsbesturing" kan helpen oplossen.

Bij de bestaande schakelingen treedt, zoals zojuist is aangestipt, in de uitgangsimpulsreeksen een onregelmatigheid op, de zg. pakkettering van impulsen, (Engels: pulse bunching), ook al is het ingangssignaal zuiver periodiek. Dit verlies van regelmaat tast de meetnauwkeurigheid aan; tabel I toont hiervan een opvallend voorbeeld. Bij frequentieregelingen kan zelfs de stabiliteit erdoor in het gedrang raken.

Om te beginnen zullen we de werking van een bestaande instelbare drietraps digitale vermenigvuldigschakeling analyseren. Hieruit zal blijken dat voor de impulspakkettering twee duidelijk verschillende oorzaken zijn aan te wijzen. De eerste, overigens vrij triviale, oorzaak bestrijdt men in de bestaande schakelingen zo goed mogelijk met behulp van een „selecteerschakeling" (Engels: pulse selection gate). Vervolgens zullen we laten zien hoe het nieuwe besturingsprincipe de tweede oorzaak elimineert [1].

Met het doel de bouw van multitraps-deelschakelingen verder te vereenvoudigen hebben wij een speciale decimale deeltrap ontwikkeld[2]. Deze nieuwe, hier slechts beknopt te bespreken, tiendeler is gebruikt in een viertraps-vermenigvuldigschakeling met intertrapsbesturing. De door ons gebouwde schakeling kan ingangssignalen met frequenties tot ongeveer 20 kHz op betrouwbare wijze vermenigvuldigen met de factor $M \times 10^{-4}$, waarin M een willekeurig geheel getal van 1 tot en met 9999 is.

Het nieuwe besturingsprincipe komt neer op een hiërarchieke taakverdeling: de eerste deeltrap wekt het volledige uitgangssignaal op, hierbij bestuurd door de volgende trappen. In de tot nu toe gebruikte schakelingen, daarentegen, vervullen de afzonderlijke trappen principieel gelijke taken.

[1] Voor een uitvoeriger behandeling zie G. Kaps, Scaling of frequency analogous measured values, Proc. IFAC Symp. on Pulse-Rate and Pulse-Number Signals, Boedapest, april 1968, blz. 148.

[2] G. Kaps en H. P. Kunert, Dekadisch aufgebauter Frequenzteiler, Duitse patentaanvrage 1285538 (23 mei 1967).

Conventionele vermenigvuldigschakelingen

We verduidelijken nu de opzet van de bestaande digitale vermenigvuldigschakelingen aan de hand van een voorbeeld.

De werking van een digitale vermenigvuldigschakeling met drie trappen volgt uit het in *fig. 1a* afgebeelde blokschema en het bijbehorende impulsdiagram, fig. 1*b*. De trappen bestaan uit een tiendeler Z_i, een keuzeschakelaar S_i, een decodeerschakeling D_i en een poort P_i. Het, zuiver periodiek veronderstelde, ingangssignaal E_1 wordt toegevoerd aan de eerste trap. Met de keuzeschakelaars kiest men de factor waarmee de schakeling de frequentie van het signaal E_1 vermenigvuldigt; in het afgebeelde geval waarbij de schakelaar S_1 op 4, S_2 op 2, en S_3 op 3 staat, is de factor 0,423. Door middel van de deelreeksen e_i komen er van iedere 1000 ingangsimpulsen 423 bij de uitgang, via de OF-schakeling en zonder noemenswaardige vertraging. Deze impulsen vormen het uitgangssignaal E_4 met de gewenste verkleinde frequentie. De impulsen zijn in fig. 1*b* voorgesteld door genummerde verticale streepjes. Impuls no. 1 verschijnt het eerste bij de ingangsklem IN van de schakeling. De nummers van de doorgelaten impulsen demonstreren het optreden van het vermelde bezwaar van deze vermenigvuldigschakelingen. Men ziet een uitgangssignaal waarvan de impulsen duidelijk niet-uniform over de tijd verdeeld zijn.

In *tabel I* staat een aantal gegevens van een ander geval, waarbij het gaat om het meten van een gepasseerd volume vloeistof in liters. De detectieapparatuur, veronderstellen we, wekt 91 impulsen per gepasseerde liter vloeistof op. De vermenigvuldigschakeling moet dan de frequentie met 0,011 vermenigvuldigen (schakelaars S_1, S_2, S_3 in fig. 1*a* op 0, 1, 1), de breuk 11/1000 is immers ongeveer gelijk aan 1/91. De grote meet-

Tabel I. Voorbeeld van een doorstroommeting waarbij impulspakkettering de geregistreerde en de werkelijke tijdstippen van passeren van een bepaald volume ernstig doet verschillen (zie de vierde kolom). De gebruikte detector wekt 91 impulsen/liter op. Een vermenigvuldigschakeling als in fig. 1*a*, ingesteld op 0,011, zorgt voor een schaaltransformatie met schaalfactor 91. De tijdstippen zijn aangegeven met het nummer van de desbetreffende impulsen. Uitgangsimpuls no. 100 is afkomstig uit de derde trap van de schakeling, alle andere in de tweede kolom zijn impulsen uit de tweede trap (de reeks e_2 in fig. 1*a*).

gepasseerd volume in liter	geregistreerd tijdstip	werkelijk tijdstip	verhouding
1	10	91	9,10
2	100	182	1,82
3	110	273	2,58
4	210	364	1,73
5	310	455	1,47
6	410	546	1,33
7	510	637	1,25
8	610	728	1,19
9	710	819	1,15

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

nauwkeurigheid ten gevolge van pakkettering blijkt uit de afwijkingen tussen de geregistreerde tijdstippen in de tweede kolom en de werkelijke tijdstippen van passeren in de derde.

Het heeft hier wellicht zin te vermelden hoe men de meest uniforme verdeling van k impulsen over een periode van 10 impulsen vastlegt (waarbij k een geheel getal 1, 2, 3, . . . , 9 is). De verdeling wordt ontleend

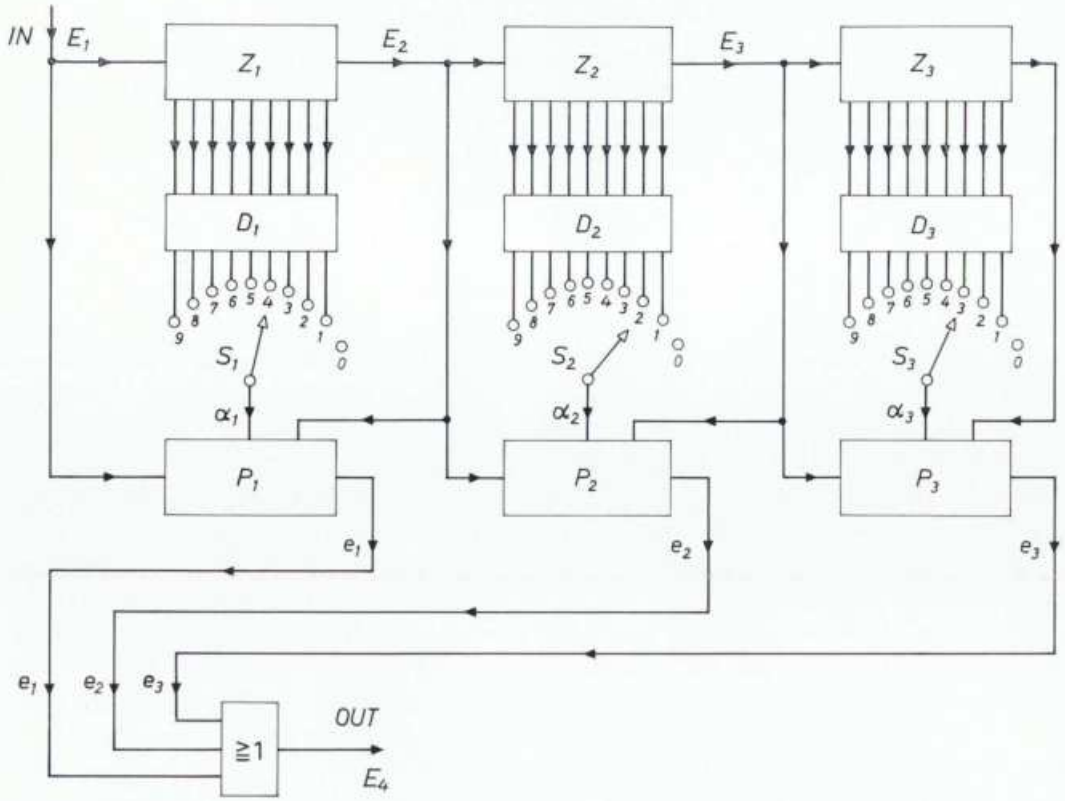


Fig. 1a. Voorbeeld van een conventionele digitale drietraps-vermenigvuldigschakeling. De schakeling bestaat uit drie tiendelers Z_i, decodeercircuits D_i, keuzeschakelaars S_i, en poorten P_i. De impulsreeksen E_1 (equidistante impulsen genummerd 1-1000), E_2 (alleen de tientallen van E_1) en E_3 (alleen de honderdtallen) zijn de ingangssignalen waaruit de trappen respectievelijk de drie deelreeksen e_1, e_2 en e_3 maken. De OF-schakeling vervlecht de deelreeksen tot het uitgangssignaal E_4 dat in het afgebeelde geval bestaat uit 423 impulsen per 1000 ingangsimpulsen. $\alpha_{1,2,3}$ stuursignalen voor de poorten P_i.

Impulspakkettering ontstaat in de beschreven schakeling zowel bij de vorming van een deelreeks als bij het vervlechten van de deelreeksen tot het uitgangssignaal.

Men ziet in fig. 1*b* dat van telkens tien ingangsimpulsen toegevoerd aan de eerste trap, slechts de eerste vier door de poortschakeling worden doorgelaten en derhalve de deelreeks vormen. Het signaal α_1 bestuurt hiertoe de poortschakeling. De tiende ingangsimpuls heropent de gesloten poort en fungeert tevens als ingangssignaal van de volgende trap. De deelreeks gemaakt in de tweede trap bestaat uit de eerste twee van elke tien ingangsimpulsen, die in de derde trap uit de eerste drie. Het is duidelijk dat de hoogst ongunstige verdeling van de doorgelaten impulsen over de periode van de tien bijbehorende ingangsimpulsen tot pakkettering in het uitgangssignaal leidt. Alleen indien slechts één impuls een poort zou mogen passeren, zou de verdeling over de tijd in de betrokken deelreeks wel regelmatig zijn.

aan de betrekking $m \geqq 10\ p/k$; hierin stelt m het nummer van de gekozen impuls voor en p is gelijk aan 1, 2, . . . , k. In *tabel II* staan de nummers m voor de diverse waarden van k; werkelijk zuiver periodiek zijn natuurlijk alleen de verdelingen met $k = 1$, 2, en 5.

Tabel II. De tekens × geven de meest uniforme verdelingen van k (= 1, 2, . . . , of 9) impulsen over een interval van tien perioden; m nummer van de te selecteren impuls.

k \ m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										×
2					×					×
3				×			×			×
4			×		×			×		×
5		×		×		×		×		×
6		×		×	×		×		×	×
7		×	×		×	×		×	×	×
8		×	×	×	×		×	×	×	×
9		×	×	×	×	×	×	×	×	×

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

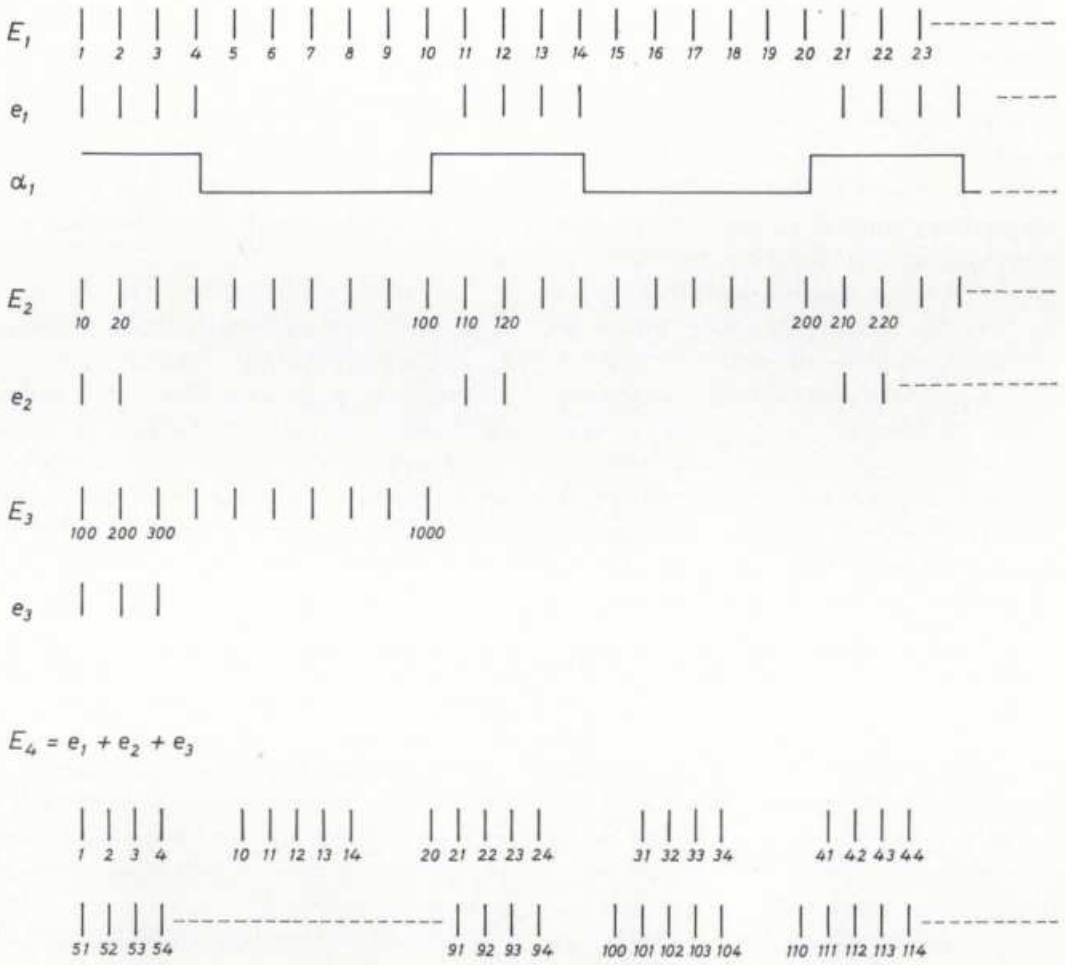


Fig. 1b. Impulsdiagram, behorend bij fig. 1*a*, voor het vermenigvuldigen van een frequentie van 1000 Hz met de factor 0,423. De impulsen, weergegeven met verticale streepjes, hebben een nummer dat hun plaats in het ingangssignaal E_1 aanduidt. De nummers van de impulsen in het uitgangssignaal E_4 illustreren de optredende onregelmatigheid (impulspakkettering). Voor de betekenis van de overige symbolen, zie fig. 1*a*.

Men verbetert de verdeling van de impulsen binnen de deelreeksen door de schakeling (fig. 1*a*) uit te breiden met „selecteerschakelingen", die geplaatst worden tussen de decodeerschakelingen en de keuzeschakelaars. De spanningstoestanden die steeds na het verschijnen van een ingangsimpuls bij een tiendeler optreden, worden simultaan door selecteer- en decodeerschakeling samen omgezet in negen verbeterde deelreeksen. De selecteerschakeling bezit negen uitgangen, via welke de verbeterde deelreeksen, bestaande uit 1, 2, 3, . . . , en 9 impulsen, de overeenkomstig genummerde contacten van de keuzeschakelaar bereiken.

De tweede oorzaak van pakkettering ligt in het vervlechten van de deelreeksen tot het uitgangssignaal (E_4). Wanneer de OF-schakeling een impuls die afkomstig is van de tweede of derde trap, toevoegt aan de deelreeks van de eerste trap, treedt in het algemeen een extra onregelmatigheid in de tijdsverdeling op. Zo is in het geval van fig. 1*b* het toevoegen van de impulsen met de nummers 10 en 20, 110 en 120, 210 en 220, enz. een voorbeeld van deze tweede vorm van impulspakkettering. In de situatie beschreven met tabel I ziet men iets dergelijks; daar wordt de regelmaat verstoord door de impuls met nummer 100, die de deelreeks van de derde trap vormt.

De eliminering van deze tweede vorm van pakkettering door het nieuwe principe van intertrapsbesturing (Engels: controlled cascading) gaan we in het volgende hoofdstuk behandelen.

Intertrapsbesturing

In het vorige hoofdstuk zagen we dat het vervlechten van de deelreeksen tot pakkettering leidt. Dat komt doordat op vaste, en niet homogeen in de tijd verdeelde, tijdstippen de impulsen uit de deelreeksen van de tweede en de derde trap toegevoegd worden aan de deelreeks opgewekt in de eerste trap. Het effect van een dergelijke toevoeging van één impuls, bij voorbeeld uit de tweede trap, is een verandering van het

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

uitgangssignaal van de schakeling als geheel: „ineens" bevat dit uitgangssignaal dan één impuls meer dan met de stand (s_1) van de keuzeschakelaar in de eerste trap overeenkomt. De tijdsverdeling van deze $s_1 + 1$ uitgangsimpulsen is slecht, ook al heeft men de s_1 impulsen wel zo goed mogelijk verdeeld over de bijbehorende periode van tien ingangsimpulsen van de eerste trap. De oplossing die intertrapsbesturing hier biedt, is, kort gezegd, het tijdelijk omschakelen van de eerste trap op $s_1 + 1$. Bij intertrapsbesturing wordt het *volledige* uitgangssignaal in de eerste trap van de vermenigvuldigschakeling opgewekt. Het vervlechten van deelreeksen, en de ermee samenhangende impulspakkettering, komt te vervallen. De impulsen in de deelreeksen van de hogere trappen functioneren als stuursignalen die de werking van de eerste trap veranderen. Preciezer geformuleerd: zodra in de deelreeks van de tweede trap een impuls verschijnt, begint een periode (een tijdsduur van tien ingangsimpulsen bij de eerste trap) waarin de keuzeschakelaar van de eerste trap de deelreeks met één impuls méér doorlaat, in plaats van de ingestelde deelreeks. Valt het besturende signaal terug naar nul, dan wordt weer gewoon de gekozen deelreeks in de eerste trap doorgelaten. De eerste trap van de schakeling laat dus per groep van 10 ingangsimpulsen een deelreeks passeren die òf het met de bijbehorende keuzeschakelaar ingestelde aantal impulsen bevat òf dat aantal plus één. De tweede trap wordt op overeenkomstige wijze bestuurd door de derde.

Voor verdere verduidelijking zullen we het nieuwe principe toepassen op het voorbeeld van fig. 1*b*. In fig. 1*a* staan de keuzeschakelaars S_1, S_2 en S_3 ingesteld op resp. 4, 2 en 3. Het ingangssignaal E_1 bestaat uit 1000 impulsen; 10 hiervan treden ook als ingangssignaal E_3 van de derde trap op. De deelreeks van de derde trap omvat 3 impulsen. Bij intertrapsbesturing nu besturen deze de tweede trap, en wel zodanig dat het effect optreedt alsof de keuzeschakelaar van de tweede trap 3 keer op $2 + 1$ wordt ingesteld, en $(10 - 3)$ keer gewoon op 2 blijft staan. Het ingangssignaal van de tweede trap bestaat uit 100 impulsen; de bijbehorende deelreeks telt, dank zij de besturing door de derde trap, 23 (namelijk $3\times(2 + 1) + (10 - 3)\times 2$, hetgeen natuurlijk ook gelijk is aan $10\times 2 + 3$) impulsen. Zonder de nieuwe besturing zou het aantal in deze deelreeks 20, of wel 10×2, zijn geweest. De genoemde 23 impulsen uit de tweede trap besturen op hun beurt de eerste trap. Hierdoor worden bij 23 groepen van 10 impulsen behorend bij het ingangssignaal E_1, vijf in plaats van vier impulsen tot de deelreeks toegelaten. Bij de overige 77 groepen van 10 — het totale ingangssignaal E_1 bestaat immers uit 1000 impulsen — komt steeds het ingestelde aantal vier in de deelreeks terecht. De deelreeks van de eerste trap bevat dan 423 impulsen per 1000 ingangsimpulsen en kan dus als uitgangssignaal van de hele schakeling fungeren.

De rekenkundige achtergrond die de intertrapsbesturing hier mogelijk maakt, bestaat uit de gelijkheden

$$423 = 23\times(4 + 1) + (100-23)\times 4$$

en

$$23 = 3\times(2 + 1) + (10-3)\times 2.$$

De selecteerschakeling in de eerste trap zorgt ervoor dat iedere groep van vijf of vier doorgelaten impulsen zo uniform mogelijk verdeeld is over de periode van de bijbehorende tien ingangsimpulsen. De selecteerschakeling in de tweede trap bepaalt de verdeling in de tijd, d.w.z. de opeenvolging van de groepen van vier en van vijf impulsen die samen de deelreeks van de eerste trap vormen. Dit toevoegen van de groepen met vijf impulsen aan de deelreeks geschiedt, dank zij de genoemde tweede selecteerschakeling, ook weer zo uniform mogelijk verdeeld over de tijd. Men kan laten zien dat de opeenvolging daartoe eveneens ontleend moet worden aan die in tabel II.

Op volkomen analoge wijze functioneert de selecteerschakeling in de derde trap: de schakeling optimaliseert de volgorde van de groepen van twee en drie impulsen die, in het voorbeeld, samen de deelreeks van de tweede trap vormen.

In het volgende hoofdstuk zullen we behandelen hoe men, gebruik makend van het nieuwe besturingsprincipe, een multitraps-deelschakeling kan samenstellen. Hierbij zal ook de nieuwe decimale deeltrap besproken worden.

Schakelingen met intertrapsbesturing

In *fig. 2* ziet men een blokschema van een drietrapsvermenigvuldigschakeling waarin het nieuwe besturingsprincipe is toegepast. De trappen bestaan ieder uit een tiendeler (Z_i) en een stuurschakeling (S_i). Het ingangssignaal (E_1) komt bij de eerste trap binnen. Het uitgangssignaal (E_4) ontstaat in de EN-schakeling uit het ingangssignaal en de deelreeks afkomstig van de eerste trap. De stuurschakelingen bevatten, naast de schakelingen voor de intertrapsbesturing, de keuzeschakelaars waarmee de vermenigvuldigingsfactor kan worden ingesteld. Denkt men weer aan vermenigvuldiging met de factor 0,423, dan dient men S_1 op 4, S_2 op 2, en S_3 op 3 te zetten. De tweede en derde trap worden gevoed met signalen E_2 en E_3 waarvan de frequentie een factor 10, respectievelijk een factor 100 kleiner is dan die van het ingangssignaal. Elke tiendeler vormt weer simultaan negen deelreeksen bestaande uit 1, 2, . . . , of 9 impulsen per tien ingangsimpulsen, op de overeenkomstig genummerde uitgangen. Deze deel-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

reeksen voeden de bijbehorende stuurschakelingen. De intertrapsbesturing is verwezenlijkt door de stuurschakelingen met elkaar te verbinden als een cascade. De derde stuurschakeling bestuurt de tweede, die op zijn beurt de eerste op dezelfde wijze beïnvloedt. De hierbij gebruikte stuurimpulsen hebben een tijdsduur die gelijk is aan de periode van tien ingangsimpulsen van de bestuurde trap. Gedurende zo'n gehele periode immers moet de keuzeschakelaar van de bestuurde trap hetzij op de ingestelde waarde plus één, hetzij op de ingestelde waarde staan. Deze instellingen komen tot stand doordat het stuursignaal de waarde „1", respectievelijk „0" aanneemt; de wijze waarop dit gebeurt zullen we hieronder nog bespreken.

De ingangssignalen (E_2 en E_3) van de hogere trappen hoeven in de schakeling van fig. 2 geen extra functies te vervullen; in fig. 1*a*, waar ze ook nog werden toegevoerd aan de poorten, was dat wèl het geval. In dit opzicht is de nieuwe schakeling dus eenvoudiger dan de conventionele.

Een in fig. 2 nog veel sterker opvallende vereenvoudiging is de afwezigheid van aparte decodeer- en selecteerschakelingen. De speciaal ontwikkelde tiendelers kiezen zelf de optimale tijdsvolgorde van de impulsen die bestemd zijn voor de deelreeksen. Daarbij ontstaan simultaan op de negen uitgangsklemmen van de delers zodanige spanningen dat aparte decodering voor het verkrijgen van de goede deelreeksen overbodig is.

De tiendelers bestaan uit vijf wipschakelingen van het zogenaamde JK-type. Dergelijke wipschakelingen hebben, naast de klokimpulsingang, twee voorwaarde-ingangen, die men de *J*- en *K*-ingang noemt (zie *fig. 3*). De beide uitgangsniveaus verschijnen op de klemmen

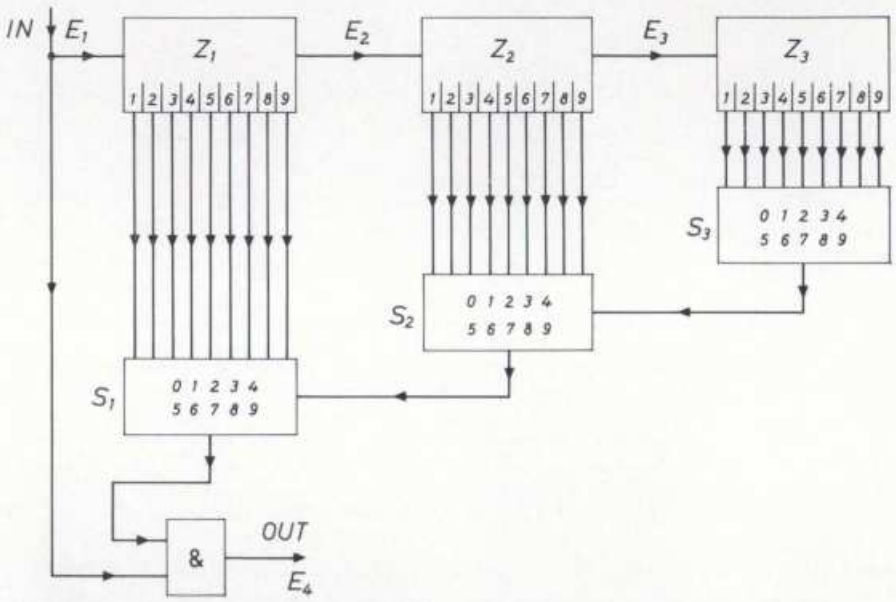
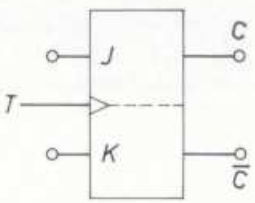


Fig. 2. Blokschema van een digitale drietraps-vermenigvuldigschakeling met „intertrapsbesturing". Een trap bestaat uit slechts een tiendeler Z_i en een stuurschakeling S_i. Aan iedere stuurschakeling worden simultaan negen deelreeksen toegevoerd, die respectievelijk 1, 2, . . . , 9 impulsen per tien ingangsimpulsen bevatten. E_1 is het ingangssignaal van de schakeling. Met behulp van S_1 kiest men de eerste decimaal van de vermenigvuldigingsfactor, met S_2 en S_3 de twee volgende. Het uitgangssignaal E_4 op de klem OUT ontstaat in een EN-schakeling door vervlechten van E_1 met de deelreeks die in de eerste trap gemaakt wordt. De deelreeksen afkomstig uit de hogere trappen besturen de stuurschakeling S_1. De ingangssignalen E_2 en E_3 zijn weer resp. de tientallen en de honderdtallen uit de reeks E_1.

C en $\bar{C}$. De invloed van de voorwaarde-ingangen op het gedrag van de wipschakeling blijkt uit de waarheidstabel. De ingang J werkt als een stelingang („set") en K als een terugstelingang („reset"), waarbij bovendien de combinatie $J = K = 1$ toegestaan is.

Een schema van de nieuwe tiendeler is afgebeeld in



J	K	C(n+1)
0	0	C(n)
0	1	0
1	0	1
1	1	$\bar{C}(n)$

Fig. 3. Een wipschakeling met twee voorwaarde-ingangen J en K. De beide uitgangsniveaus verschijnen op de klemmen C en $\bar{C}$. T is de klokimpulsingang. De waarheidstabel beschrijft de invloed van J en K op C. $C(n+1)$ en $C(n)$ stellen het niveau op C voor wanneer de klokimpuls genummerd $n+1$, resp. n juist is verschenen. Men ziet dat, bij voorbeeld, het niveau niet verandert, d.w.z. $C(n+1) = C(n)$, wanneer $J = K = 0$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

fig. 4. Men ziet daarin ook wipschakelingen met twee ingangen *J*. Het niveau dat dan voor *J* in de waarheidstabel geldt, is het uitgangssignaal van een OF-schakeling, waaraan de signalen worden toegevoerd die bij de dubbele ingang vermeld staan. Alle wipschakelingen werken synchroon, met andere woorden: een ingangsimpuls bereikt gelijktijdig de vijf klokimpulsingangen. van overzichtelijkheid zijn de schakelingen echter weggelaten.

Het signaal op de uitgang C_1 bestaat uit één impuls per tien ingangsimpulsen van de betrokken deler, vandaar dat dit signaal bij een multitraps-deelschakeling ook als ingangssignaal (kloksignaal) voor de volgende deler fungeert.

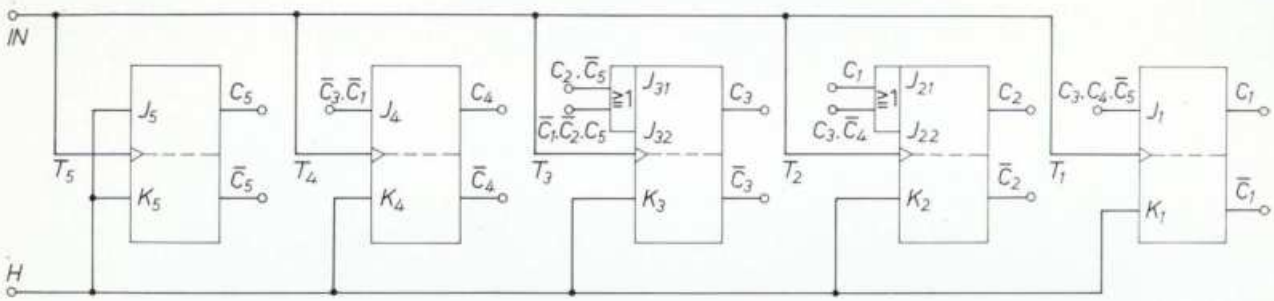


Fig. 4. Schema van de nieuwe tiendeler die aparte decodeer- en selecteerschakelingen overbodig maakt. De schakeling is samengesteld uit vijf wipschakelingen met voorwaardeingangen *J* en *K* (Philips FCJ 101; vgl. fig. 3). Een ingangsimpuls bereikt via klem IN gelijktijdig de vijf klokimpulsingangen T_i. De uitgangsniveaus verschijnen op de klemmen C_1, $\bar{C}_1$, C_2, $\bar{C}_2$, enz.; zij vormen de deelreeksen met respectievelijk 1, 9, 2, 8, enz. impulsen (per tien ingangsimpulsen). Alle voorwaarde-ingangen *K* liggen, via de klem *H*, permanent op niveau „1". Niet getekend een aantal EN- en NIET-schakelingen waarin de voorwaardesignalen voor de ingangen *J* tot stand komen.

Op de uitgangen C_1, C_2, . . . , C_5 verschijnen deelreeksen met 1, 2, . . . , respectievelijk 5 impulsen per tien klokimpulsen. Twee impulsen in zo'n deelreeks volgen nimmer direct op elkaar, wat we bereikt hebben door alle ingangen *K* voortdurend op niveau „1" te houden. Het niveau „1" bestaat dan op de genoemde uitgangsklemmen nooit langer dan de tijd die verloopt tussen het binnenkomen van twee opeenvolgende klokimpulsen.

De uitgangsklemmen $\bar{C}_4$, $\bar{C}_3$, $\bar{C}_2$, en $\bar{C}_1$ leveren de deelreeksen met respectievelijk 6, 7, 8, en 9 impulsen. De verdeling over de tijd van de impulsen der negen deelreeksen staat in *tabel III*.

De hier gekozen tijdsverdeling wijkt iets af van die in tabel II, waardoor de tiendeler veel eenvoudiger te verwezenlijken valt. De pakkettering wordt daar nauwelijks erger van, wat een gunstig compromis betekent tussen het vermijden van pakkettering en het vereenvoudigen van de schakeling. Behalve de vijf wipschakelingen zijn slechts een aantal EN- en NIET-schakelingen nodig bij het opwekken van de signalen voor de ingangen *J*. Deze signalen, in logische notatie, staan in fig. 4; om redenen

Fig. 5 is een gedetailleerd schema van de intertrapsbesturing bij een digitale vermenigvuldigschakeling waarin drie tiendelers van het beschreven type zijn opgenomen. Aan de hand van deze figuur zullen we de werking van de besturing nu wat vollediger bespreken.

De schakelaar S_3 heeft één dek met tien contactklemmen, de beide andere schakelaars elk twee. Men ziet dat bij elke groep van tien contactklemmen één klem zich permanent op het „0"-niveau bevindt; een te kiezen decimaal moet immers ook nul kunnen zijn. De andere negen zijn verbonden met de uitgangsklemmen van de delers waarop de deelreeksen staan. Bij de schakelaars S_1 en S_2 verschijnen op de genummerde contactklemmen van het „onderdek" de deelreeksen waarvan de aantallen impulsen overeenstemmen met deze nummers, bij het „bovendek" zijn die aantallen impulsen

Tabel III. De deelreeksen, m.a.w. de volgorden van de spanningsniveaus „0" en „1", zoals deze aan de uitgangsklemmen C_1, C_2, . . . , $\bar{C}_1$ van de nieuwe tiendeler optreden.

nummer klokimpuls \ klem	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	$\bar{C}_4$	$\bar{C}_3$	$\bar{C}_2$	$\bar{C}_1$
1	0	0	0	1	1	0	1	1	1
2	0	0	1	0	0	1	0	1	1
3	0	1	0	0	1	1	1	0	1
4	0	0	0	1	0	0	1	1	1
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1
6	0	0	1	1	0	0	0	1	1
7	1	0	0	0	1	1	1	1	0
8	0	1	0	0	0	1	1	0	1
9	0	0	1	1	1	0	0	1	1
10	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

steeds één groter dan de nummers.

Het ingangssignaal wordt samen met het stuursignaal s_1 toegevoerd aan een EN-schakeling. Het uitgangssignaal van deze EN-schakeling is het gewenste uitgangssignaal bij OUT. De stuursignalen (s_1 en s_2) ontstaan bij de eerste en de tweede trap door een OF-vervlechting van twee signalen die op hun beurt ge-

(10 − l) maal voor. In een periode dat het stuursignaal s_3 op het niveau „1" of — even lang durend — op het niveau „0" staat, treedt in de deelreeksen van de tweede tiendeler (k + 1) maal, respectievelijk k maal het niveau „1" op en, derhalve, (9 − k) maal, respectievelijk (10 − k) maal het niveau „0". De voorgaande zin geldt ook voor de eerste tiendeler, mits men s_3 vervangt

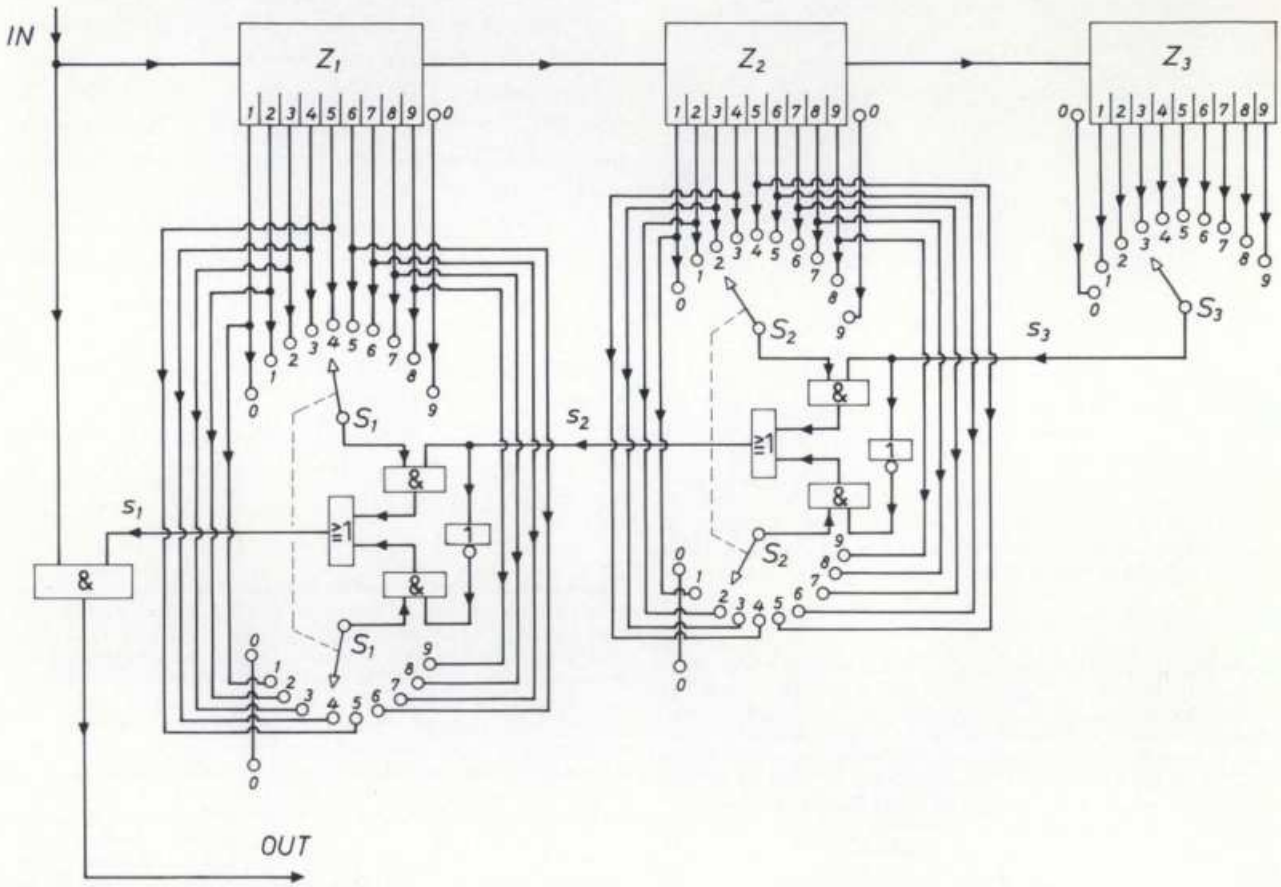


Fig. 5. Gedetailleerd schema van de intertrapsbesturing, toegepast in de digitale vermenigvuldigschakeling waarvan het blokschema in fig. 2 staat. De stuursignalen, opgewekt in de drie stuurschakelingen, zijn aangeduid met s_1, s_2 en s_3. Het geïllustreerde geval leidt tot een uitgangssignaal bestaande uit 423 impulsen per 1000 ingangsimpulsen. De cijfers 1, . . . , 9 binnen de tiendelers Z_i duiden de uitgangsklemmen aan waarop de deelreeksen met de overeenkomstige aantallen impulsen verschijnen.

maakt zijn met twee EN-schakelingen. Aan de ingangen van deze EN-schakelingen staan de twee deelreeksen (gekozen met de betrokken schakelaar) en het, al of niet omgekeerde, stuursignaal afkomstig uit de volgende trap.

De besturing in fig. 5 werkt, zoals we reeds weten, „van achteren naar voren"; er zijn twee beginsituaties: het stuursignaal s_3 op niveau „1" of op niveau „0". Veronderstel dat men de keuzeschakelaars S_1, S_2 en S_3 instelt op respectievelijk j, k en l, waarbij alle gehele getallen tot tien en ook nul mogelijke keuzen zijn. Per duizend impulsen op de ingang van de eerste trap doen zich de genoemde beginsituaties respectievelijk l en

door s_2 en k door j. In *fig. 6* staat vermeld hoeveel malen het uitgangssignaal van de schakeling „1" of „0" wordt als functie van het stuursignaal s_2. Op analoge wijze is aangegeven het aantal malen dat de niveaus „1" en „0" in het signaal s_2 optreden afhankelijk van de twee reeds genoemde beginsituaties. Deze verdelingen van niveaus „1" en „0" vindt men gemakkelijk door met behulp van de waarheidstabellen voor EN- en OF-schakelingen na te gaan wat de schakeling doet met de signalen „1" en „0", afkomstig van de derde keuzeschakelaar. De besturing komt duidelijk tot uitdrukking: steeds bij een stuursignaal gelijk aan „1" verschijnen in het uitgangssignaal (j + 1),

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en niet j, impulsen per periode van tien.

Ter illustratie van de verbetering die met de zojuist beschreven vermenigvuldigschakeling bereikbaar is, beschouwen we nog eens de doorstroommeting waarbij vermenigvuldiging met de factor 0,011 tot ernstige

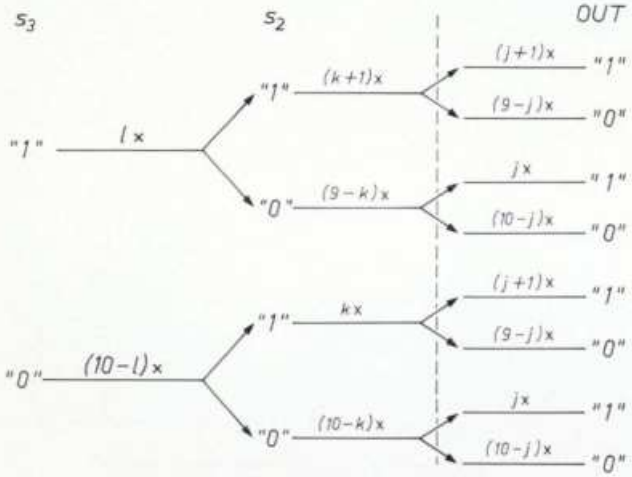


Fig. 6. Verdeling van de niveaus „1" (impuls) en „0" (geen impuls) in het uitgangssignaal (OUT) en in de stuursignalen s_3 en s_2 van de digitale vermenigvuldigschakeling, afgebeeld in fig. 5. Het totale aantal uitgangsimpulsen per 1000 ingangsimpulsen is $l\,\{(k+1)(j+1)+(9-k)j\}+(10-l)\,\{k(j+1)+(10-k)j\} = 100\,j+10k+l$, waarbij j, k en l de waarden zijn, ingesteld met de keuzeschakelaars S_1, S_2 en S_3 (zie fig. 5). × aantal malen dat het betrokken niveau optreedt.

Tabel IV. De doorstroommeting vermeld in tabel I, nu echter uitgevoerd met behulp van de verbeterde drietraps-vermenigvuldigschakeling (fig. 5). De tijdstippen van de uitgangsimpulsen, aangeduid met de impulsnummers in de tweede kolom, stemmen veel beter met de werkelijkheid overeen dan in tabel I het geval was (zie de vierde kolom). Uitgangsimpulsen no. 737 en 787 komen tot stand door een stuursignaal uit de derde trap van de vermenigvuldigschakeling via de tweede trap ($s_3 = 1$, $s_2 = 1$, vgl. fig. 6), de andere zeven door stuursignalen uit de tweede trap alleen ($s_3 = 0$, $s_2 = 1$).

gepasseerd volume in liter	geregistreerd tijdstip	werkelijk tijdstip	verhouding
1	77	91	1,18
2	177	182	1,03
3	277	273	0,98
4	377	364	0,97
5	477	455	0,95
6	577	546	0,95
7	677	637	0,94
8	737	728	0,99
9	787	819	1,04

pakkettering leidde (tabel I). De toepassing van intertrapsbesturing leidt in dit geval tot de resultaten, vermeld in *tabel IV*. De eerste en de derde kolom, het gepasseerde volume en de werkelijke tijdstippen van passeren, zijn gelijk aan die in tabel I. De tweede kolom, evenals de vierde, laat duidelijk zien hoeveel beter de tijdstippen van de uitgangsimpulsen overeenstemmen met de werkelijkheid. Het stuursignaal uit de derde trap, gerekend per 1000 ingangsimpulsen van de eerste trap, bestaat in het gekozen voorbeeld uit slechts één impuls: die met nummer 700. De nummers van de stuurimpulsen afkomstig uit de tweede trap zijn 70, 170, 270, 370, 470, 570, 670, 730, 780, 870, 970. Dat 730 en 780 optreden, en niet 770, is het gevolg van de besturing door de derde trap.

De beperking tot drie trappen, zoals die in fig. 5 bestaat, is natuurlijk niet van principiële aard. Wij hebben inmiddels ook een digitale viertraps-vermenigvuldigschakeling van het nieuwe type gebouwd. De prestaties komen overeen met de verwachtingen. Deze schakeling kan frequenties tot ongeveer 20 kHz op betrouwbare wijze vermenigvuldigen met alle factoren die vier decimalen achter de komma hebben, van 0,0001 tot en met 0,9999.

Samenvatting. Digitale multitraps-vermenigvuldigschakelingen, toegepast bij het meten en regelen van frequenties, vertonen in hun uitgangssignaal gewoonlijk impulspakkettering (periodiciteitsverlies). Pakkettering ontstaat zowel bij het vormen van een deelreeks in een trap als bij het vervlechten van deelreeksen tot het uitgangssignaal.

Men heeft „intertrapsbesturing" ontwikkeld, een nieuw besturingsprincipe dat impulspakkettering bij het vervlechten van deelreeksen elimineert. Gebaseerd op dit principe ontstaat in de eerste trap een deelreeks bestaande uit een volgorde van groepen met s en $s+1$ impulsen (per tien ingangsimpulsen). Het getal s is de eerste decimaal van de gewenste factor. De deelreeks van de tweede trap (beïnvloed door de derde, enz.) bestuurt het afwisselen van s en $s+1$ op zodanige wijze dat de deelreeks van de eerste trap het volledige uitgangssignaal voorstelt en bovendien optimale periodiciteit bezit.

Voorts wordt een verbeterde tiendeler beschreven, bestaande uit vijf synchroon werkende wipschakelingen van het JK-type. Op tien uitgangsklemmen staan gelijktijdig deelreeksen met 0, 1, 2, . . . , 9 impulsen (per tien ingangsimpulsen), elk met optimale periodiciteit. Een gering aantal logische schakelingen vervlecht de uitgangen van de wipschakelingen; daardoor zijn aparte decodeer- en selecteerschakelingen niet nodig.

Het nieuwe principe volgend heeft men met de verbeterde tiendelers drie- en viertraps-vermenigvuldigschakelingen gebouwd. De viertrapsversie vermenigvuldigt frequenties tot ongeveer 20 kHz met elke factor in vier decimalen van 0,0001 tot en met 0,9999, daarbij de impulspakkettering optimaal reducerend.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!